



## Treball Final de Grau

# *Disseny d'un túnel virtual de vent per a la prova de perfils aerodinàmics*

---

**Grau en Enginyeria Mecànica**

**Curs 17/18**

Autor: Lluís Pujol Castellà

Director: Jose Juan de Felipe Blanch

Data: 07 de juny de 2018

Localitat: Manresa



## RESUM DEL PROJECTE

En el present document es dissenya un model virtual d'un túnel de vent i el seu ús està pensat per estudiar els perfils aerodinàmics que es creguin convenients per tal d'obtenir dades i resultats molt similars als models reals de túnel de vent.

Es comença amb una breu introducció a l'aerodinàmica i les característiques físiques de l'aire com a fluid, seguit de la descripció dels models reals de túnel de vent, els seus usos i els perfils o cossos que s'hi estudien, també es descriuen els procediments que s'utilitzen en els programaris de simulació de fluids per tal de reflectir la realitat.

En el procés de definició del model es duu a terme el disseny dels perfils a estudiar amb eines de disseny en 3D com és el SolidWorks. Aquests perfils són importats al programari de simulació de volums finits com és el Flow3d degut al seu gran potencial per simular problemes complexos de dinàmica computacional de fluids.

Pel que fa a la definició del model virtual com a tal, es duu a terme el càlcul de tots els paràmetres de partida necessaris, la justificació de decisions i hipòtesis, així com la descripció detallada del model pel que fa a geometria, fluids, física del model, condicions inicials i de contorn, entre altres. De manera que queden justificats els passos seguits en el procés de definició i es permet recrear i utilitzar el model definit si interessa.

Posteriorment es realitzen varies simulacions del model virtual definit estudiant-hi un perfil alar concret per tal d'obtenir les forces generades per l'aire sobre tal perfil. Sempre prioritzant el bon comportament de la simulació i la convergència de resultats.

Finalment es realitza una comparativa dels diferents paràmetres obtinguts en les simulacions amb els valors reals coneguts per tal de demostrar l'eficàcia del model en referència a representar la realitat de manera correcta.

A mesura que s'ha anat avançant amb les simulacions s'ha anat comprenent la gran precisió que tenen els models reals i el repte que suposa intentar-ho reproduir virtualment de manera efectiva. Tot i així, les simulacions han estat satisfactòries tant pels resultats en sí com la comparativa que han permès dur a terme. També s'ha pogut entendre i comprovar els principis teòrics en que es basa el programari de simulació utilitzat i el seu potencial a l'hora de simular la realitat.



## SUMMARY OF THE PROJECT

The present document contains the process of designing a virtual model of a wind tunnel. The objective of the model is the study of the behavior of airfoils in a really similar way compared to the real models.

The beginning of the project consists of a brief introduction in aerodynamics and the physical properties of air, followed by the description of the real models of wind tunnels, their uses and the objects that are studied in them. Moreover, there is the explanation of the procedures used by simulation software in order to reflect and approximate reality.

In the process of the model's definition, the 3D design of the selected airfoils is performed with computer aided design tools such as SolidWorks. These airfoil models are then imported to the simulation software that work with the finite volume method such as Flow3d because of its potential when it comes to solving complex problems of computational fluid dynamics.

Regarding the definition of the virtual model, the calculation of the necessary initial data is performed as well as the justification of decisions and hypothesis considered. Furthermore, there is a detailed description regarding the geometry, fluids, physics of the model, initial and boundary conditions, and more. These procedures justify the whole definition and enables anyone to recreate the model if considered necessary and convenient.

Subsequently, many simulations of the virtual model are performed in which a selected airfoil is studied so the aerodynamic forces can be obtained, always prioritizing the adequate behavior of the simulation and ensuring the convergence of the results.

Finally, there is a comparative of the different parameters obtained in these simulations with the real known values in order to demonstrate the effectiveness of the model regarding the proper representation of reality.

The progression through the simulations has come with the comprehension of the astonishing precision of the real models and the challenge that supposes trying to reproduce them virtually and effectively. That being said, the simulations have been successful due to both the results and the comparative that has been possible to do with. What's more, the theoretical principals that the simulation software works with have been comprehended and proved as well as its potential of simulation.



# ÍNDEX

<b>1. INTRODUCCIÓ.....</b>	<b>9</b>
1.1. OBJECTIUS I FINALITAT DEL PROJECTE .....	9
1.2. ABAST DEL PROJECTE I LIMITACIONS.....	10
<b>2. ANTECEDENTS .....</b>	<b>11</b>
2.1. JUSTIFICACIÓ .....	11
2.2. SITUACIÓ ACTUAL.....	11
2.3. AERODINÀMICA I PERFILS ALARS.....	12
2.3.1. Fluxos subsònics i perfils alars .....	14
2.4. DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL (CFD) .....	17
<b>3. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES INICIALS .....</b>	<b>19</b>
3.1. ELECCIÓ I DEFINICIÓ DEL PERFIL AERODINÀMIC .....	20
3.2. DEFINICIÓ DE VARIABLES DE LES SIMULACIONS .....	21
<b>4. PRE-PROCESSAMENT: DEFINICIÓ DEL MODEL.....</b>	<b>25</b>
4.1. GENERAL.....	25
4.2. PROPIETATS FÍSiques.....	26
4.3. FLUIDS.....	29
4.4. MALLAT I GEOMETRIA.....	29
4.4.1. Geometria i propietats dels components.....	29
4.4.2. Malla.....	34
4.4.3. Condicions de contorn.....	38
4.4.4. Condicions inicials .....	40
4.5. OUTPUT .....	41
4.6. NUMÈRICS.....	43
4.7. SIMULACIÓ .....	43
<b>5. POST-PROCESSAMENT .....</b>	<b>45</b>

5.1. CONTORNS DE PRESSIÓ .....	45
5.2. VECTORS DE VELOCITAT I LA SEVA MAGNITUD .....	46
5.3. FORCES AERODINÀMIQUES DEL PERFIL NACA 4412 .....	47
5.3.1. Angle d'atac de $-10^{\circ}$ .....	48
5.3.2. Angle d'atac de $-5^{\circ}$ .....	50
5.3.3. Angle d'atac de $0^{\circ}$ .....	52
5.3.4. Angle d'atac de $5^{\circ}$ .....	54
5.3.5. Angle d'atac de $10^{\circ}$ .....	56
<b>6. CÀLCUL I ANÀLISI DELS RESULTATS .....</b>	<b>59</b>
6.1. VALORS CARACTERÍSTICS DEL PERFIL NACA 4412 SEGONS EL MODEL VIRTUAL .....	59
6.2. VALORS CARACTERÍSTICS REALS DEL PERFIL NACA 4412.....	62
6.3. ANÀLISI I COMPARATIVA DELS RESULTATS.....	64
<b>7. ASPECTES A MILLORAR .....</b>	<b>71</b>
<b>8. ESTUDI TEMPORAL I IMPLICACIONS AMBIENTALS.....</b>	<b>73</b>
<b>9. CONCLUSIONS .....</b>	<b>75</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>77</b>



# ÍNDEX DE FIGURES I TAULES

FIGURA 1. FORCES AERODINÀMIQUES .....	12
FIGURA 2. CARACTERÍSTIQUES DELS PERFILS ALARS.....	15
FIGURA 3. FORMA DEL PERFIL ALAR NACA 0015 .....	16
FIGURA 4. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC .....	16
FIGURA 5. CLASSIFICACIÓ DEL VALOR DE LA N CRÍTICA .....	17
FIGURA 6. EXEMPLE DE COEFICIENTS AERODINÀMICS EN FUNCIÓ DE L'ANGLE D'ATAC. ....	17
FIGURA 7. MODEL 3D DE LES PARETS DEL TÚNEL DE VENT .....	19
FIGURA 8. FORMA DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	20
FIGURA 9. MIDES DEL PERFIL NACA 4412 QUE S'UTILITZARAN .....	21
FIGURA 10. LLISTA DE DADES QUE OFEREIX AIRFOIL TOOLS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	21
FIGURA 11. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC DE 0°.....	22
FIGURA 12. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC DE +5°.....	23
FIGURA 13. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC DE +10°.....	23
FIGURA 14. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC DE -5°.....	23
FIGURA 15. ESQUEMA DE L'ANGLE D'ATAC DE -10°.....	24
FIGURA 16. PESTANYES DEL PROGRAMARI FLOW3D.....	24
FIGURA 17. PESTANYA DE "DENSITY EVALUATION" DEL FLOW3D .....	26
FIGURA 18. PESTANYA DE "HEAT TRANSFER" DEL FLOW3D .....	27
FIGURA 19. PESTANYA DE "VISCOSITY AND TURBULENCE" DEL FLOW3D .....	28
FIGURA 20. CONFIGURACIÓ DEL PRIMER COMPONENT DE GEOMETRIA DEL FLOW3D.....	30
FIGURA 21. CONFIGURACIÓ DEL PRIMER SUBCOMPONENT DE GEOMETRIA DEL FLOW3D .....	31
FIGURA 22. CONFIGURACIÓ DE LA SEGONA COMPONENT DE GEOMETRIA DEL FLOW3D .....	32
FIGURA 23. CONFIGURACIÓ DELS ALTRES SUBCOMPONENTS DE GEOMETRIA DEL FLOW3D .....	33
FIGURA 24. EXEMPLE DEL CONJUNT 3D DELS DOS COMPONENTS DE GEOMETRIA .....	33
FIGURA 25. ICONES DE GEOMETRIA DEL FLOW3D .....	34
FIGURA 26. CONFIGURACIÓ DEL MALLAT GENERAL DEL FLOW3D .....	36
FIGURA 27. CONFIGURACIÓ DEL MALLAT ESPECÍFIC DEL FLOW3D.....	37
FIGURA 28. EXEMPLE DE CONJUNT 3D DELS BLOCS DE MALLAT.....	38
FIGURA 29. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA DE CONDICIONS DE CONTORN DEL FLOW3D .....	40
FIGURA 30. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA DE CONDICIONS INICIALS DEL FLOW3D (1) .....	40
FIGURA 31. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA DE CONDICIONS INICIALS DEL FLOW3D (2) .....	41
FIGURA 32. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA D'OUTPUT DEL FLOW3D (1) .....	42
FIGURA 33. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA D'OUTPUT DEL FLOW3D (2) .....	42
FIGURA 34. CONTORNS DE PRESSIÓ DE LA SIMULACIÓ PER A UN ANGLE D'ATAC DE +10° .....	45
FIGURA 35. VELOCITAT DEL FLUID DE LA SIMULACIÓ PER A UN ANGLE D'ATAC DE +10°.....	46
FIGURA 36. CONFIGURACIÓ DE LA PESTANYA DE "PROBE" PER OBTENIR LES GRÀFIQUES DE FORCES AERODINÀMIQUES .....	47
FIGURA 37. GRÀFICA DE LA FORÇA DE RESISTÈNCIA EN FUNCIÓ DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE -10° .....	48
FIGURA 38. GRÀFICA DE LA FORÇA DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIÓ DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE -10°.....	49

FIGURA 39. GRÀFICA DE LA FORÇA DE RESISTÈNCIA EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $-5^\circ$ .....	50
FIGURA 40. GRÀFICA DE LA FORÇA DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $-5^\circ$ .....	51
FIGURA 41. GRÀFICA DE LA FORÇA DE RESISTÈNCIA EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $0^\circ$ .....	52
FIGURA 42. GRÀFICA DE LA FORÇA DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $0^\circ$ .....	53
FIGURA 43. GRÀFICA DE LA FORÇA DE RESISTÈNCIA EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $5^\circ$ .....	54
FIGURA 44. GRÀFICA DE LA FORÇA DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $5^\circ$ .....	55
FIGURA 45. GRÀFICA DE LA FORÇA DE RESISTÈNCIA EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $10^\circ$ .....	56
FIGURA 46. GRÀFICA DE LA FORÇA DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIO DEL TEMPS PER A UN ANGLE D'ATAC DE $10^\circ$ .....	57

TAULA 1. CLASSIFICACIÓ DE FLUXOS D'AIRE .....	13
TAULA 2. ICONES DE LA PESTANYA " <i>MESHING &amp; GEOMETRY</i> " DEL FLOW3D .....	29
TAULA 3. CONDICIONS DE CONTORN DEL MALLAT GENERAL .....	38
TAULA 4. CONDICIONS DE CONTORN DEL MALLAT ESPECÍFIC .....	39
TAULA 5. PARÀMETRES DE LA PESTANYA DE NUMÈRICS .....	43
TAULA 6. FORCES DE RESISTÈNCIA EN FUNCIO DEL TEMPS I ANGLE D'ATAC .....	60
TAULA 7. FORCES DE SUSTENTACIÓ EN FUNCIO DEL TEMPS I ANGLE D'ATAC .....	61
TAULA 8. FORCES AERODINÀMIQUES OBTINGUES EN LES SIMULACIONS .....	62
TAULA 9. COEFICIENTS AERODINÀMICS REALS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	63
TAULA 10. FORCES AERODINÀMIQUES REALS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	64
TAULA 11. FORCES AERODINÀMIQUES REALS I VIRTUALS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	64
TAULA 12. QUOCIENT DE LES FORCES AERODINÀMIQUES REALS I VIRTUALS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	65
TAULA 13. COMPARATIVA DE LES FORCES AERODINÀMIQUES VIRTUALS I REALS DEL PERFIL ALAR NACA 4412 .....	67
TAULA 14. ERROR RELATIU DE LES FORCES AERODINÀMIQUES VIRTUALS RESPECTE LES REALS .....	68
TAULA 15. ERROR RELATIU MITJÀ DE LES FORCES AERODINÀMIQUES VIRTUALS RESPECTE LES REALS .....	68
TAULA 16. DEDICACIÓ TEMPORAL EN LES TASQUES DEL PROJECTE .....	73
TAULA 17. EMISSIONS DE $\text{CO}_2$ EN LA REALITZACIÓ DEL PROJECTE .....	74

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Objectius i finalitat del projecte

El treball que es presenta pertany a l'àmbit de la dinàmica de fluids computacional (CFD). On es dissenya i es dimensiona un model virtual que pretén simular el comportament real d'un túnel de vent, en el qual s'estudia el seu comportament respecte els túnels reals i se'n verifica la seva veracitat de resultats.

L'objectiu d'aquest projecte és, per tant, crear un model virtual de túnel de vent subsònic amb un software de CFD, el qual s'anomena Flow3d, per provar perfils aerodinàmics d'interès.

Per tal de que el disseny sigui efectiu també es defineix com a objectiu verificar que els fluxos d'aire i les forces generades reflecteixen els de la realitat, de manera que es pugui demostrar la fiabilitat del model. Aquesta comprovació és durà a terme fent una comparació de forces de resistència aerodinàmica i de sustentació d'un perfil alar obtingudes en el model virtual respecte els seus valors reals.

Aquest model ha de permetre que s'hi puguin dur a terme les següents tasques de manera fiable i reproduïble:

- Provar i estudiar diferents perfils aerodinàmics contra un flux de vent de velocitat i densitat desitjada.
- Poder realitzar càlculs de forces i coeficients de sustentació i resistència aerodinàmica que reflecteixin la realitat.
- Visualitzar i comprovar els diferents esforços i tensions a que estan sotmesos els perfils d'estudi. Per exemple esforços tallants, gradient de pressions, etc.
- Si s'escau, observar el comportament del flux d'aire al voltant de vehicles, estructures simples, etc.

A més, també s'utilitza programari de disseny assistit per ordinador, com és el SolidWorks, per tal de dimensionar i mesurar els objectes d'estudi de les simulacions de manera més còmode i per tant cobrir algunes necessitats de pre-processament del programari Flow-3d.

## 1.2. Abast del projecte i limitacions

Del model virtual se'n defineixen els següents abasts i limitacions:

- Escalabilitat del model, sempre en mides coherents; des d'un túnel de centímetres fins a varis metres.
- Permetre un ampli rang de formes d'interès per a les parets: prismàtiques, cilíndriques i, si s'escau, esfèriques, còniques, toroidals, etc.
- Possibilitat de provar i estudiar qualsevol objecte, perfil, etc. Sempre que se'n tingui el seu fitxer en format .STL, i sigui d'interès el seu corresponent estudi aerodinàmic.
- El model permet dur a terme simulacions des de varis segons fins a alguns minuts. El temps ha de ser sempre superior a 70 segons per tal que el fluid tingui temps d'adaptar-se a les diferents formes de l'objecte.
- La velocitat de treball sempre ha de ser subsònica. Pot ser constant o variable (per exemple, lineal, potencial, etc. Però sempre evitant canvis bruscos de velocitat). Específicament, el rang de velocitats de treball va d'entre 0 i 100 m/s de manera que s'evitin els esforços i compressions del fluid generades per l'apropament a la velocitat del so.
- Les característiques de l'aire es poden variar en gran mesura, ja que es pot definir la seva pressió, temperatura i densitat, viscositat, etc.

## 2. ANTECEDENTS

### 2.1. Justificació

L'Escola Politècnica d'Enginyeria Superior de Manresa (EPSEM) imparteix, entre altres, els graus en Enginyeria Mecànica i grau en Automoció i, especialment en aquests graus, s'imparteixen molts coneixement de mecànica de fluids, termodinàmica, enginyeria tèrmica, etc. A més, la universitat compta amb el departament d'enginyeria Minera, Industrial i TIC, el qual té laboratoris on els estudiants hi desenvolupen pràctiques ja sigui de motors tèrmics, mecànica de fluids, etc. Així doncs, aportar un model virtual d'un túnel de vent és una eina interessant degut a la gran versatilitat que té.

Per tant, aquest projecte té uns fins clarament acadèmics, ja sigui per investigació, per aportar més coneixement en aquests àmbits, etc. On, partint del model virtual d'aquest projecte, és puguin dur a terme proves i estudis per veure el comportament del flux d'aire, mesurar els esforços a que estan sotmesos els perfils en qüestió i fins i tot adaptar el model per tal de dur a terme simulacions de més complexitat.

### 2.2. Situació actual

En enginyeria, un túnel de vent és un sistema que genera una corrent d'aire, limitat per un conducte de secció determinada i/o variable al llarg del túnel. Tenen la finalitat d'aconseguir condicions especials en el flux i poder simular el moviment d'objectes per tal d'analitzar els diferents fenòmens aerodinàmics; forces, línies de corrent, esforços al que estan sotmesos aquests objectes, corbes característiques de ventiladors, perfils alars, etc. A més, es classifiquen en funció de la seva velocitat de treball respecte la velocitat del so, en funció de la seva arquitectura poden ser de circuit obert o tancat i segons la seva pressió de treball poden ser atmosfèrics o de densitat variable.

Actualment els túnels de vent són imprescindibles pel desenvolupament i l'avanç de l'aerodinàmica, ja que contemplar la possibilitat de dissenyar objectes aerodinàmics resulta difícil sense abans haver provat en un túnel de vent les seves propietats de sustentació, resistència aerodinàmica i estabilitat.

La possibilitat de dissenyar un model virtual d'un túnel de vent obre moltes possibilitats per tal de simular el comportament dels objectes aerodinàmics, permetent manipular molt fàcilment la seva forma, llargada i, com és obvi, evitar els costos que suposen muntar i calibrar els túnels de vent reals. Al tractar-se d'un model virtual, fa que sigui fàcilment escalable a pràcticament qualsevol rang de mides desitjat, de manera que és adaptable a túnels de vent petits, per provar perfils, per exemple, o túnels de vent de mides considerables, per estudiar el comportament de vehicles d'automoció, etc.

## 2.3. Aerodinàmica i perfils alars

Ja que en aquest projecte es duu a terme un anàlisi de les forces generades en un túnel de vent sobre l'objecte d'estudi, és essencial definir els conceptes bàsics d'aerodinàmica i els perfils que s'utilitzaran i la seva nomenclatura corresponent.

L'aerodinàmica és l'estudi del moviment de l'aire, concretament la interacció d'aquest aire amb objectes sòlids, com per exemple una ala d'un avió. És una branca de la dinàmica de fluids i dinàmica de gas que es limita a estudiar exclusivament l'aire.

Entendre el comportament de l'aire al voltant d'un objecte permet el càlcul de forces i moments que actuen sobre aquest objecte. Les forces fonamentals en els problemes de l'aerodinàmica són les de sustentació, resistència, impuls i el pes, tal i com es veu en la figura 1:

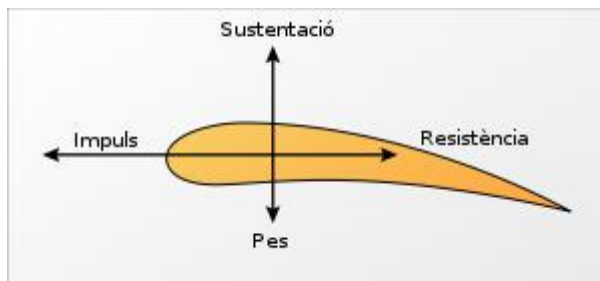


Figura 1. Forces aerodinàmiques

D'aquestes forces, les de sustentació i de resistència són les generades per l'aire i, per tant, s'anomenen forces aerodinàmiques. El càlcul d'aquestes forces està basat en considerar que l'aire es comporta com a flux continu. Aquest flux està caracteritzat per la seva velocitat (és important remarcar que la velocitat sempre és relativa respecte l'objecte d'estudi), pressió, densitat, temperatura, les quals poden anar en funció de la posició i el temps.

A partir de les forces aerodinàmiques esmentades, se'n calculen els seus coeficients aerodinàmics, els quals són adimensionals, que s'anomenen:

- Coeficient de sustentació, el qual es defineix com:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot v^2 \cdot S}$$

- Coeficient de resistència aerodinàmica:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot v^2 \cdot S}$$

On,  $C_L$  és el coeficient de sustentació,  $C_D$  és el coeficient de resistència,  $F_L$  és la força de sustentació,  $F_D$  és la força de resistència,  $\rho$  és la densitat de l'aire,  $v$  és la velocitat de l'aire, i  $S$  és la superfície del cos projectada perpendicularment respecte a la direcció del flux.

Cal esmentar que, exclusivament per perfils alars, aquests s'estudien bidimensionalment, de manera que representen forces per 1 metre d'extrusió del perfil. Per tant, els coeficients aerodinàmics per a perfils alars es calculen amb les següents fórmules:

- Coeficient de sustentació **per a perfils alars**:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot v^2 \cdot l_c}$$

- Coeficient de residència aerodinàmica **per a perfils alars**:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot v^2 \cdot l_c}$$

On  $l_c$  és la longitud de corda del perfil alar en qüestió. (les característiques dels perfils alars, com la longitud de corda, es defineixen seguidament en l'apartat <2.3.1. Fluxos subsònics i perfils alars>.

Per definir el règim de velocitats es té en compte en número de Mach, que és un número adimensional que es defineix segons l'equació següent:

$$M = \frac{v}{v_s}$$

On  $M$  és el número de Mach,  $v$  és la velocitat de treball i  $v_s$  és la velocitat de propagació del so per l'aire, que, en condicions normals, és d'aproximadament 340 m/s. Per exemple el valor de Mach 1 correspon a la velocitat del so, Mach 2 al doble de la velocitat del so, etc.

Els fluxos d'aire es poden classificar segons el règim de velocitats, tal i com es mostra en la taula 1:

Tipus de flux	Numero de Mach (M)
Subsònic	$0 < M < 1$
Transsònic	$0 < M \leq 1 \quad i \quad M > 1$
Supersònic	$1 < M < 5$
Hipersònic	$M \geq 5$

Taula 1. Classificació de fluxos d'aire

És important esmentar que un flux de fluid es pot caracteritzar segons si és laminar o turbulent.

- Pel que fa al flux laminar, es defineix com un flux en el que el fluid està ordenat, movent-se en làmines sense barrejar-se amb ell mateix i cada partícula segueix la seva trajectòria, anomenada línia de corrent.
- En referència al flux turbulent, aquest tipus de flux té un comportament caòtic on les partícules mouen desordenadament i amb trajectòries de petits remolins. El flux turbulent suposa baixos nivells de difusió, molta convecció i ràpides variacions de pressions i velocitats.

El número de Reynolds és un número adimensional que, depenent del seu valor, es pot descriure un flux com a laminar o turbulent. Es pot definir com a la relació de les forces inercials i les forces viscoses presents en un fluid. En referència als perfils alars, es defineix segons la següent equació:

$$Re = \frac{v \cdot l_c}{\nu}$$

On  $Re$  és en numero de Reynolds,  $v$  és la velocitat del fluid,  $l_c$  és la longitud de la corda del perfil alar, i  $\nu$  és la viscositat cinemàtica.

La viscositat cinemàtica del fluid que s'expressa en  $m^2/s$  i es defineix segons l'equació següent:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

On  $\mu$  és la viscositat dinàmica del fluid, que s'expressa en  $Pa \cdot s$ , i  $\rho$  és la densitat del fluid.

En aerodinàmica, la transició de flux laminar a turbulent es produeix per números de Reynolds en el rang des de mig milió fins a 10 milions, depenent de la rugositat de la superfície, la superfície, de la distribució de pressions, etc. Per tant, per valors de  $Re \leq 5 \cdot 10^5$  es té en consideració la laminaritat de la capa límit.

### 2.3.1. Fluxos subsònics i perfils alars

El flux subsònic és el d'interès per a aquest projecte ja que és el que té el rang de velocitats quotidianes i de més interès general, ja sigui per provar vehicles d'automoció, estructures simples, etc.

Així doncs, els perfils de més interès són els perfils alars subsònics, els quals tenen una forma molt característica: una superfície arrodonida a davant, seguit d'una cua punxeguda al darrera, tal i com es veu en la figura 2. Els perfils alars solen generar molt poca resistència, i, depenent de l'angle d'atac, generen més o menys sustentació, aquesta pot ser positiva si és vertical i va cap a munt, o negativa si es vertical i va cap avall.

Pel que fa a la seva terminologia, els perfils alars tenen la següent classificació:

En primer lloc, un perfil alar és pot dividir en dos superfícies:



- Superfície de succió, que correspon a la superfície superior del perfil, i va associada amb tenir poca pressió estàtica.
- Superfície de pressió, que correspon la superfície inferior, la qual té més pressió estàtica que la superior.

El gradient de pressió entre aquestes dues superfícies és el que provoca la força de sustentació.

En segon lloc, per descriure el perfil s'utilitzen els següents termes:

- L'extrem d'atac, és el punt de davant del perfil que té màxima curvatura (mínim radi).
- L'extrem de fuga és el punt de darrera del perfil amb màxima curvatura.
- La **línia de corda**, és una línia imaginària que connecta l'extrem d'atac i el de sortida.

En tercer lloc, per determinar la seva forma s'utilitzen els següents paràmetres:

- La línia mitjana, és el línia que delimita la superfície superior i inferior al llarg del perfil.
- El gruix, el qual varia al llarg del perfil. Aquest pot ser mesurat perpendicularment a la corda o a la línia mitjana.

En la figura 2 s'hi representen les característiques anteriors:

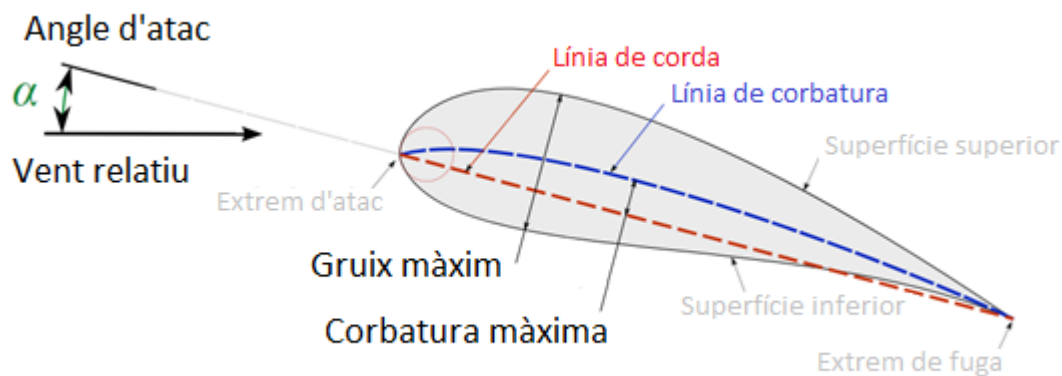


Figura 2. Característiques dels perfils alars

Per últim, per descriure el seu comportament en moviment s'utilitzen els següents conceptes:

- El centre aerodinàmic, que és el punt de la corda on el moment generat és independent del coeficient de sustentació i de l'angle d'atac.
- El centre de pressió, el qual és el punt de la corda on el moment general és zero.

A més a més, cal esmentar que existeixen els perfils alars anomenats NACA, els quals adopten les sigles del *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) dels Estats Units, aquest comitè va ser creat l'any 1915 i dissolt l'any 1958, passant a formar part de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Aquests perfils tenen una sèrie de paràmetres que descriuen el perfil en qüestió. Hi ha perfils des de 4 dígits fins a 8 dígits.

La nomenclatura de 4 dígits és la més simple de perfils asimètrics. Per exemple, el perfil alar NACA 2412 té una màxima curvatura del 2% (respecte la longitud de corda) situada al 40% de la línia mitjana des de l'extrem d'atac (0.4) amb un màxim espessor del 12% de la longitud de la corda. Les nomenclatures de més de 4 dígits simplement descriuen perfils més complexos.

Com a segon exemple, el perfil alar NACA 0015 és simètric, ja que no té curvatura (0%) i el 15 indica que té un 15% màxim de gruix respecte la longitud de la corda. Tenint aquests paràmetres i utilitzant varies equacions complexes s'obté la forma completa detallada del perfil alar desitjat, tal i com es veu en la figura 3.

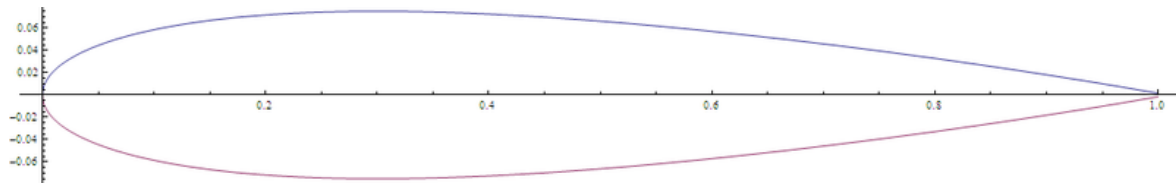


Figura 3. Forma del perfil alar NACA 0015

Aquesta nomenclatura de perfils permet definir perfils alars de pràcticament qualsevol forma i poder classificar-los, també se'ls hi poden atribuir els coeficients aerodinàmics definits anteriorment, els quals varien en funció del nombre de Reynolds, de l'angle d'atac i de la  $N$  crítica. Aquest dos últims paràmetres es defineixen a continuació:

- L'angle d'atac és l'angle d'inclinació de la línia de corda del perfil alar respecte el flux d'aire. En la figura 4 s'hi veu representat amb la lletra  $\alpha$ :

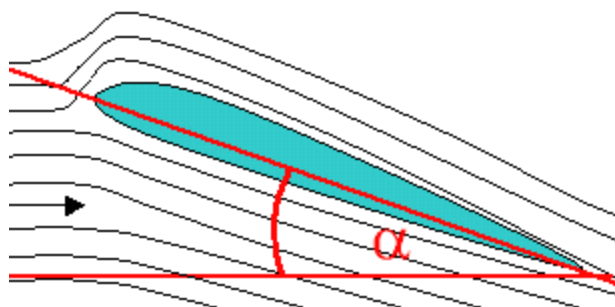


Figura 4. Esquema de l'angle d'atac

- La  $N$  crítica és un valor que s'associa a la qualitat del flux en qüestió. Per als túnels de vent, la  $N$  crítica descriu la qualitat d'aquest segons l'escala que s'observa en la figura 5:

Situation	Ncrit
sailplane	12 to 14
motorglider	11 to 13
clean wind tunnel	10 to 12
average wind tunnel	9
dirty wind tunnel	4 to 8

Figura 5. Classificació del valor de la N crítica

I, com més alt és, més net és el túnel i de més qualitat és el flux que genera, de manera que apareixen menys turbulències indesitjades.

De manera que a cada perfil alar se li atribueix les seves corbes característiques de coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac per uns números de Reynolds i N crítica concrets. Les gràfiques de la figura 6 en són exemples.

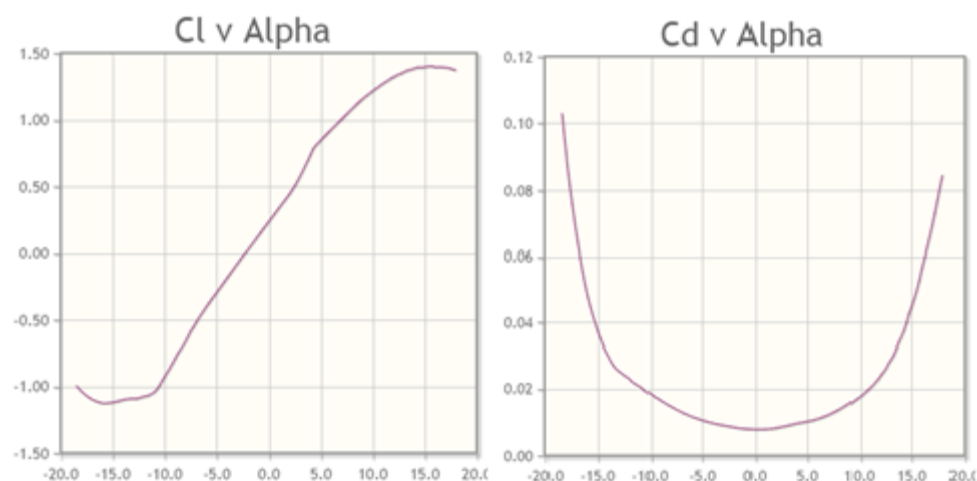


Figura 6. Exemple de coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac.

Tal i com es veu en les figura 6, el “Cl v Alpha” representa la força de sustentació (la lletra L ve de “Lift”, sustentació en anglès) en funció de l'angle d'atac. El mateix per la gràfica “Cd v Alpha” però en aquest cas es tracta de la força de resistència aerodinàmica (la lletra D ve de “Drag”, arrossegament o resistència aerodinàmica en anglès).

## 2.4. Dinàmica de Fluids Computacional (CFD)

Justament per els avantatges esmentats en l'apartat <2.2. Situació actual> és d'interès fer ús de programari de CFD, aquesta és una branca de la mecànica de fluids que utilitza anàlisi numèric i algorismes per resoldre i analitzar problemes que involucren fluxos de fluid. S'utilitzen computadores per tal de dur a terme els càlculs necessaris per simular la interacció de gasos i líquids amb superfícies definides per condicions de contorn. La recerca actual permet la incorporació del software per tal d'augmentar la velocitat de càlcul per analitzar situacions cada cop més complexes i minimitzar el marge d'error. Tot i així,

en alguns casos només es poden obtenir resultats aproximats degut a la complexitat de simular la realitat.

Els mètodes utilitzats en CFD es basen en discretitzar una regió de l'espai creant el què es coneix com a malla espacial, de manera que s'aconsegueix dividir l'espai en volums de control finits. Posteriorment es resolen en cada cèl·lula les equacions de conservació discretitzades, obtenint una matriu algebraica de cada cèl·lula de forma iterativa fins a minimitzar l'error. Molts problemes plantejats amb CFD es resolen mitjançant les equacions de Navier-Stokes, les quals defineixen el comportament de fluxos de fluid per a cada estat (gas o líquid). D'aquestes equacions se'n poden simplificar els termes que tenen en compte la viscositat per tal de tenir en compte les equacions d'Euler i després de varies simplificacions més incloent vorticitat i pertorbacions de fluxos subsònics i supersònics permet fer l'ús d'equacions de flux compressible.

Pel que fa als diferents mètodes de discretització dels programari de CFD els tres més utilitzats són:

- Volums finits:

El mètode de volums finits o FVM (*Finite volume method*) és comú en CFD ja que té els avantatges referents a ús de memòria i velocitat de resolució, especialment per a grans problemes, fluxos turbulents amb números de Reynolds alts. Al ser el més adequat per a fluids, és el mètode que utilitza el Flow3d.

Les equacions més comunes del FVM són les de Navier-Stokes, les de conservació de massa i energia i les equacions de turbulència. Aquesta discretització permet la conservació dels fluxos dins de volums de control discrets. L'equació que regeix el FVM té la forma següent:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q \, dV + \iint F \, dA = 0$$

On Q és el vector de les variables considerades, F és el vector dels fluxos, i V és el volum del volum de control, i A és l'àrea de la superfície del volum de control.

- Elements finits:

El mètode d'elements finits o FEM (*Finite element method*) s'utilitza en anàlisi estructural de sòlids, però també es aplicable a fluids. És un mètode més estable que el FVM però, tot i així, les equacions del FEM requereixen certa atenció a l'hora de assegurar la convergència de la solució.

- Diferències finites:

El mètode de diferències finites o FDM (*Finite difference method*) té la seva importància històrica i és senzilla de programar. Actualment s'utilitza només en alguns programes especialitzats que comporten geometries complexes i requereixen molta precisió i eficiència per tal d'utilitzar contorns on hi ha contacte i superposició de mallats.

### 3. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES INICIALS

Com a plantejament inicial, cal determinar unes dades de partida, considerar hipòtesis i construir el model a partir d'aquests paràmetres. Per tant, el primer que cal definir són els mides orientatives que tindrà el túnel de vent virtual, que són les següents:

- Llargada: 10 metres.
- Alçada interior: 2 metres.
- Amplada interior: 4 metres.

De manera que un model 3D d'aquestes mides seria tal i com es veu en la figura 7:

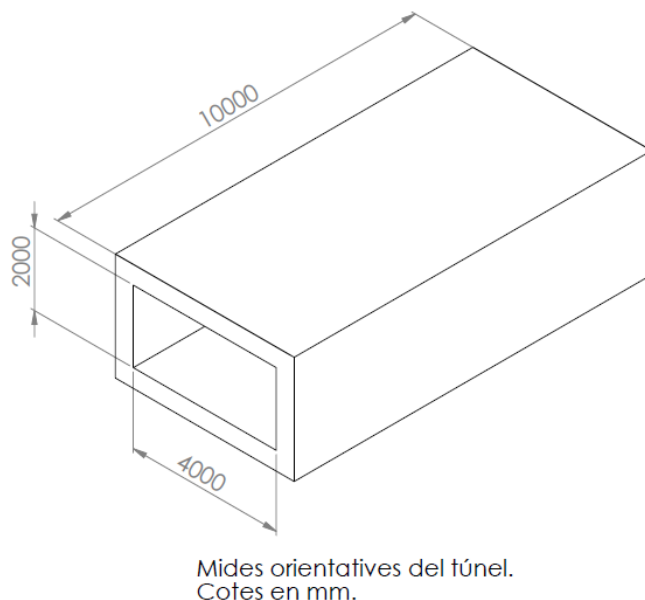


Figura 7. Model 3D de les parets del túnel de vent

D'aquesta manera, en aquest model hi poden cabre perfectament perfils alars de mides considerables, i també, per exemple, vehicles d'automoció.

A continuació, sabent les mides aproximades del túnel de vent, es procedeix a escollir i dimensionar el perfil alar amb el que es realitzaran les simulacions. S'utilitzen perfils alars ja que se'n coneix molt detalladament el seu comportament de resistència aerodinàmica i de sustentació en funció de l'angle d'atac, i, al ser les variables que s'estudiaran, es pot fer una bona comparativa entre les dades reals i les del túnel virtual.

### 3.1. Elecció i definició del perfil aerodinàmic

Dins de la gran varietat de perfils i les seves corresponents dades que ofereix la web de Airfoil Tools (<http://www.airfoiltools.com/>), es va decidir optar per el perfil NACA 4412, ja que és un perfil no massa asimètric, amb no massa curvatura i té totes les seves corbes característiques en la web. Segons la nomenclatura NACA, els números 4412 defineixen que el perfil té:

- 4% de curvatura màxima situada al 40% de la línia mitjana des de l'extrem d'atac.
- 12% de gruix màxim.

Aquests percentatges són respecte la longitud de la línia de corda del perfil.

El perfil NACA 4412, per tant, té la forma que s'observa en la figura 8:

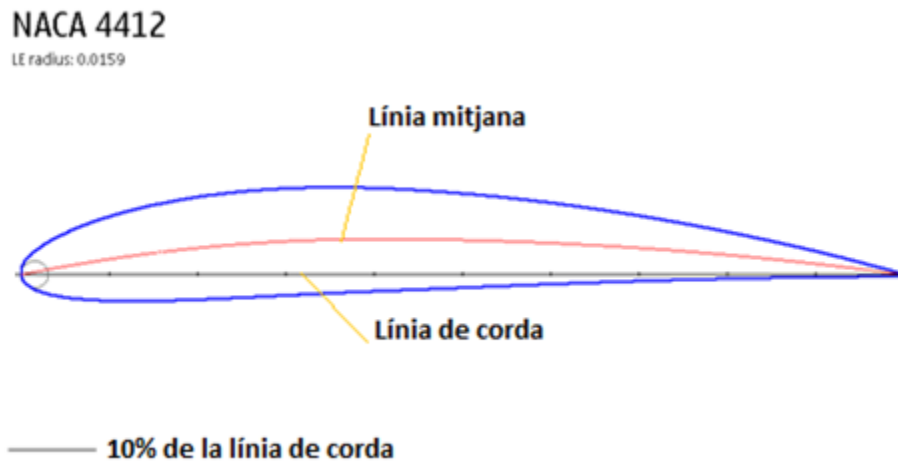


Figura 8. Forma del perfil alar NACA 4412

Per tal de treballar amb aquest perfil alar en el Flow3d, se'n necessita el seu arxiu en format .STL. El procediment per obtenir-lo és el següent:

Des de l'enllaç <<https://grabcad.com/library/naca-4412-1>> s'obté l'arxiu CAD del perfil NACA 4412, aquest perfil té una longitud de 4 polzades (101.6 mm) i està extruït 8 polzades (203.2 mm) i, com que aquestes mides es poden modificar sense afectar les seves corbes característiques, es poden modificar segons convingui.

Així doncs, com que aquestes mides són considerablement petites per a les mides inicials que s'han definit, utilitzant el software SolidWorks es decideix escalar 10 vegades la seva mida original del perfil (de manera que queda una longitud de perfil d'aproximadament 1 metre) i es manté l'extrusió a 1 metre exacte, ja que els coeficients aerodinàmics de perfils alars es calculen bidimensionalment i aquests representen les forces per 1 metre d'extrusió. De manera que les mides definitives són les que es mostren en les figura 9.

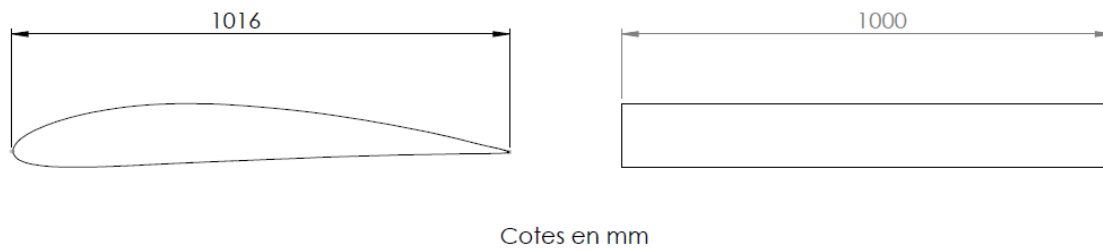


Figura 9. Mides del perfil NACA 4412 que s'utilitzaran

Per tant, la línia de corda d'aquest perfil té una mida de 1.016 metres i té 1 metre d'extrusió.

Un cop dimensionat el perfil, SolidWorks permet guardar-lo en format .STL i ja es pot importar al Flow3d.

### 3.2. Definició de variables de les simulacions

La velocitat de treball del túnel és un paràmetre que cal calcular de manera precisa, ja que afecta al número de Reynolds, i, ja que les corbes característiques dels perfils alars es defineixen en funció d'aquest, s'ha de tenir en consideració.

Com que la línia de corda del perfil té una longitud de 1.016 metres (considerablement gran) suposarà treballar amb un número de Reynolds molt elevat, el qual definirem a 1 milió, (el més gran que ofereix Airfoil Tools tal i com es veu en imatge 10) sempre i quan la velocitat de treball que s'obtingui sigui adequada i coherent.

#### Polars for NACA 4412 (naca4412-il)

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	50,000	9	33.4 at $\alpha=9.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	50,000	5	36.1 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	9	56.1 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	5	57.4 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	9	78.1 at $\alpha=7^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	5	76.6 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	500,000	9	107.5 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	500,000	5	101.1 at $\alpha=5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	1,000,000	9	129.4 at $\alpha=5.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	1,000,000	5	119.2 at $\alpha=4.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

[Reynolds number calculator](#)

Figura 10. Llista de dades que ofereix Airfoil Tools del perfil alar NACA 4412

Tal i com es veu en la figura 10, tenim dos conjunts de dades per al número de Reynolds de 1 milió, aquests es diferencien per la seva N crítica, que pren valors de 5 o 9, i s'agafa precisament el valor de 9 ja que, segons l'escala de la N crítica, aquest valor representa un túnel de vent estàndard.

Així doncs, partir del número de Reynolds s'obté la velocitat de treball exacta segons l'equació següent:

$$Re = \frac{v \cdot l_c}{\nu} \quad \rightarrow \quad v = \frac{Re \cdot \nu}{l_c}$$

On:

$$Re = 10^6$$

$$l_c = 1.016 \text{ m}$$

$$\nu = 1.4604 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

La viscositat cinemàtica correspon a la de l'aire a 15°C.

Per tant:

$$v = \frac{Re \cdot \nu}{l} = \frac{10^6 \cdot 1.4604 \cdot 10^{-5}}{1.0162} = \mathbf{14.38 \text{ m/s}} = 51.74 \text{ km/h}$$

El valor de la velocitat calculat és perfectament vàlid i coherent ja que està en règim subsònic i s'allunya del punt en que els efectes de compressibilitat del fluid comencen a ser notables. De manera que les simulacions per aquest perfil es faran concretament a 14.38 m/s.

També s'ha de tenir en compte que cal fer varies simulacions per a varis angles d'atac. Per exemple, fer simulacions dels angles d'atac de -10°, -5°, 0°, +5° i +10° seria suficient ja que a partir de les dades obtingudes de 5 simulacions es pot fer un bon anàlisi dels resultats, i així s'evita fer un nombre de simulacions exagerat. A continuació, en les figures 11, 12, 13, 14 i 15 s'hi representa cada angle d'atac que s'estudiarà:

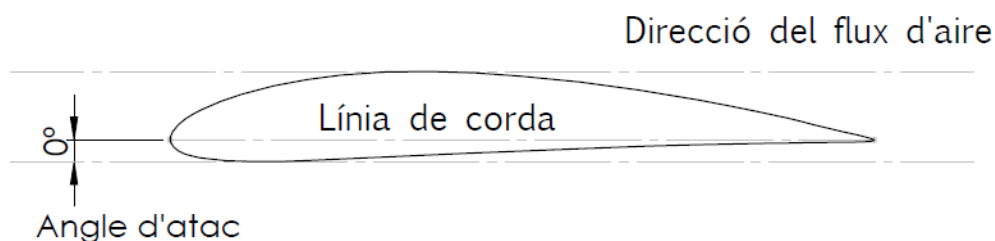
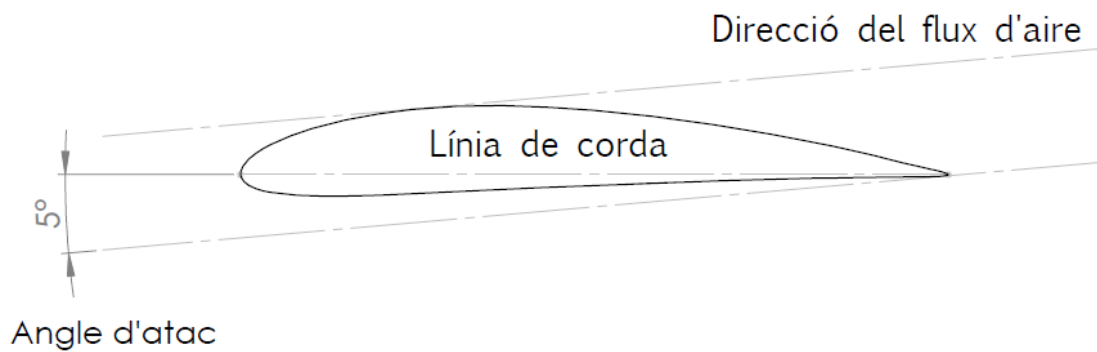


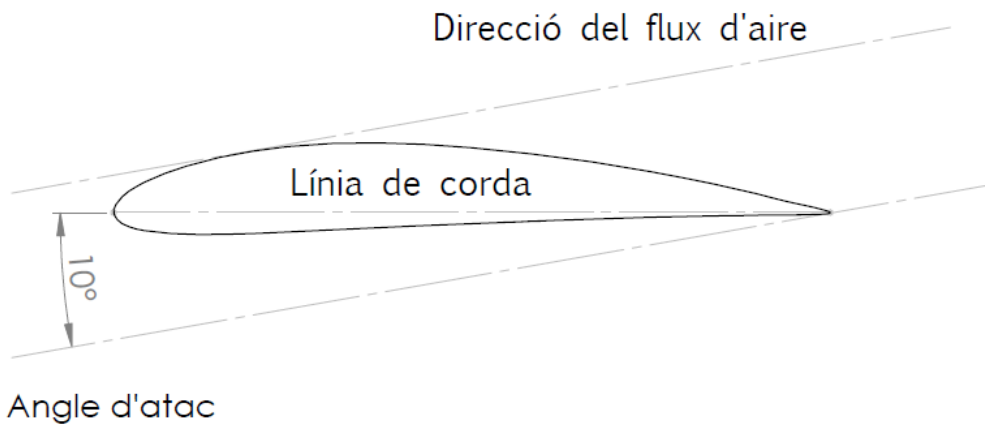
Figura 11. Esquema de l'angle d'atac de 0°

Tal i com es veu en la figura 11, per un angle d'atac de 0°, la línia de corda i el flux d'aire són paral·lels entre ells.

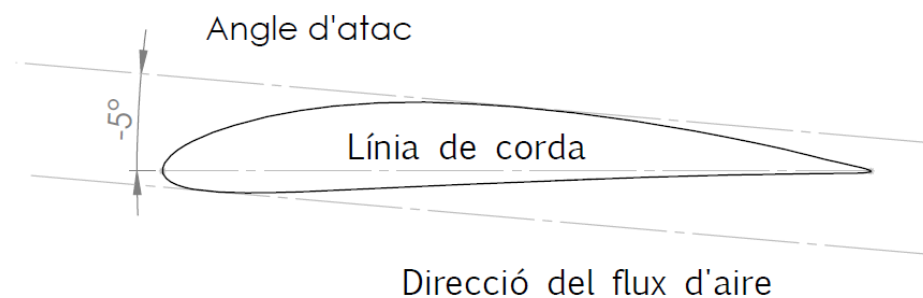


Figura 12. Esquema de l'angle d'atac de  $+5^\circ$ 

La figura 12 representa l'angle d'atac de  $+5^\circ$ , ja que el flux d'aire ve des de sota del perfil.

Figura 13. Esquema de l'angle d'atac de  $+10^\circ$ 

En la figura 13 és el mateix que el cas anterior però amb un angle més pronunciat, en aquest cas de  $+10^\circ$ .

Figura 14. Esquema de l'angle d'atac de  $-5^\circ$ 

En canvi, en les figures 14 i 15 s'hi representen angles d'atac negatius, de  $-5^\circ$  i  $-10^\circ$  respectivament, ja que el flux ve des de sobre el perfil i produïrien menys sustentació o fins i tot sustentació negativa.

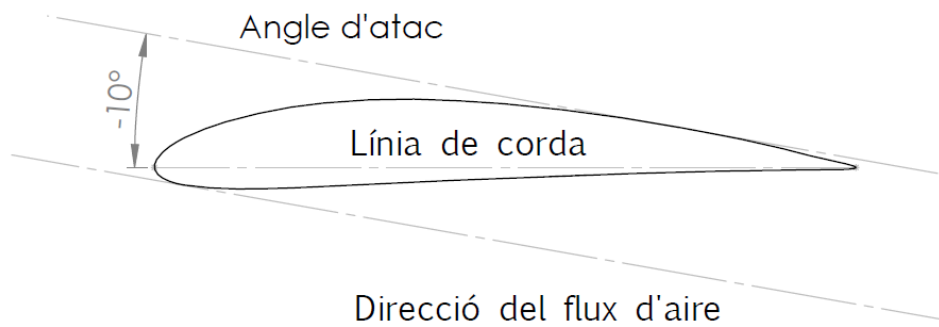


Figura 15. Esquema de l'angle d'atac de  $-10^\circ$

I, fins aquí, la definició dels paràmetres previs a fer servir el programari Flow3d. Abans de començar amb el pre-processament, cal distingir les diferents pestanyes del programa, les quals són:

- 1) “*Simulation Manager*”: és on s’organitzen les simulacions i des d’on s’executen i es controla com progressa la simulació fins a completar-se.
- 2) “*Model Setup*”: És on es duu a terme tot el pre-processament.
- 3) “*Analyze*”: És on s’hi pot iniciar el post-processament, en alguns casos no solen ser suficients les capacitats de post-processar del Flow3d de manera que és regular utilitzar el FlowSight, que és el programari de post-processat que complementa el Flow3d i es solen instal·lar ambdós al mateix temps.
- 4) “*Display*”: és la pestanya on es mostren els resultats del post-processament de la pestanya “*Analyze*”, ja siguin gràfiques, l’evolució d’elements 3D, etc. per tal d’observar els resultats de la simulació i, per exemple, fer les corresponents animacions.

En la figura 16 es mostren aquestes pestanyes tal i com són en el Flow3d.

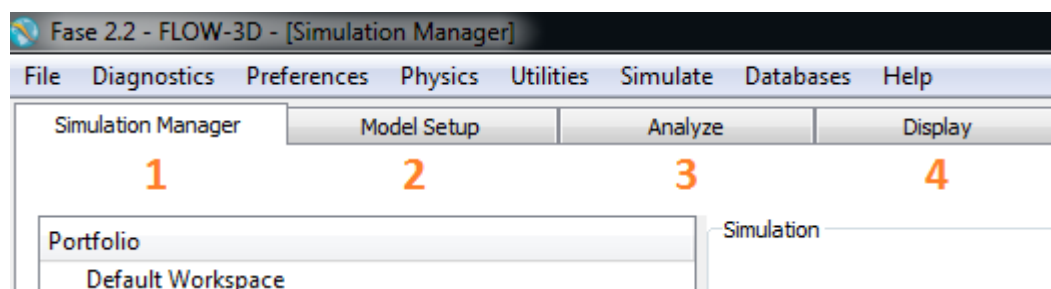


Figura 16. Pestanyes del programari Flow3d

## 4. PRE-PROCESSAMENT: DEFINICIÓ DEL MODEL

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, tot el pre-processament correspon a la pestanya de “*Model Setup*”, i, com a qualsevol problema de CFD, el pre-processament es divideix en els següents apartats:

- Definició de paràmetres generals, com ara el temps de simulació, les unitats amb que es treballarà, etc. Aquesta part correspon a la pestanya de “*Model Setup/General*”.
- Definició de les propietats físiques de la simulació, on s'activen les propietats com la transferència de calor, turbulència, gravetat, humitat, etc. Aquesta part correspon a la pestanya de “*Model Setup/Physics*”.
- Definició dels fluids i les seves propietats, aquesta correspon a la pestanya “*Model Setup/Fluids*”.
- Definició de la geometria, volums de control, condicions inicials i de contorn, etc. que es realitza en la pestanya de “*Model Setup/Meshing and geometry*”.
- Definició dels paràmetres que es volen estudiar, com pressions, esforços, velocitats, etc. que es dur a terme en la pestanya de “*Model Setup/Output*”.
- Definició dels paràmetres que caracteritzen la simulació, com per exemple els passos temporals, tipus d'advecció a considerar, solució de fluxos, etc. Aquesta part correspon a la pestanya de “*Model Setup/Numerics*”.

Per tant, a continuació es detalla pas a pas tota la definició del model, pestanya a pestanya. Tant per permetre la recreació del model per si és d'interès, com per especificar cada una de les característiques definides a la simulació. Ja que, degut al gran potencial del programa i a la immensitat d'opcions i paràmetres que es poden definir, és important deixar clar què s'ha tingut en compte a l'hora de crear el model del túnel virtual de vent.

### 4.1. General

En la pestanya de “General”, cal especificar-hi les variables que es llisten a continuació:

En primer lloc, el temps de simulació, es pot especificar un temps específic o una condició final; quan es defineix un temps específic, aquest cal que sigui sempre superior a 70 segons, per tal de que el sistema arribi a un punt estable i d'aquesta manera se'n puguin extreure resultats fiables. Si un cop s'ha fet la simulació es veu que no s'ha arribat a un estat últim fiable, es pot repetir la simulació ampliant el temps o bé fer clic dret sobre la simulació i seleccionar l'opció “*Add Restart Simulation*” que permet partir dels resultats de la simulació prèvia i allargar el temps de simulació. Pel que fa a la condició final, cal optar per aquesta opció quan s'està molt segur de que la simulació convergirà adequadament, ja que si no convergeix la simulació es pot allargar en excés.

En segon lloc, ja que en aquestes simulacions no hi hauran canvis de fase ni contactes entre dos fluids diferents, cal seleccionar l'opció de "*No sharp interface*" en el "*Interface tracking*".

En tercer lloc, pel que fa a número de fluids, ens interessa tenir un sol fluid el qual ja en definirem les seves propietats posteriorment, per tant, cal seleccionar l'opció d'un sol fluid.

En quart lloc, referent a les unitats de la simulació utilitzarem les del Sistema Internacional (SI), i per la temperatura farem servir graus Kelvin, ja que és l'opció més còmode per treballar i fer càlculs posteriorment.

Per últim, però molt important, definirem el nostre flux de fluid com a incompressible. Tot i que els fluxos reals són tots compressibles, depenent de les condicions, es pot arribar a considerar un flux com a incompressible quan els seus efectes deguts a canvi de densitat són menyspreables. Això succeeix quan el règim de velocitats és subsònic i està significativament allunyat de la velocitat del so. Concretament es pot considerar flux incompressible quan el número de Mach és inferior a 0.3 (una velocitat d'aproximadament 102 m/s). En cas de que es superi aquest valor, cal descriure el flux com a compressible. Per tant, com que treballarem molt per sota de Mach 0.3 podem definir el flux com a incompressible sense cap dubte.

## 4.2. Propietats físiques

En al segona pestanya, "*Physics*", s'hi defineixen les propietats físiques del model que es llisten a continuació:

- "*Density evaluation*":

Pel que fa a la densitat, definirem que s'avaluï en funció d'altres paràmetres com la temperatura o altres escalars. Ja que no és necessari definir equacions d'aproximació perquè els canvis de densitat seran pràcticament menyspreables. Per tant, l'avaluació de la densitat quedarà tal i com es mostra en la figura 17:

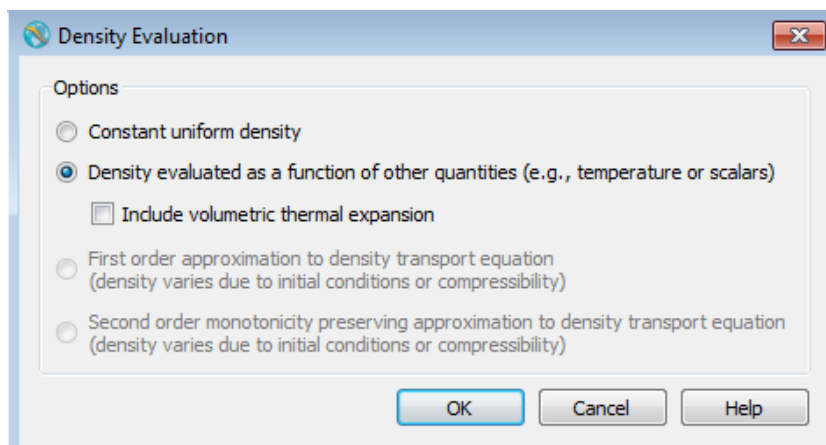


Figura 17. Pestanya de "*Density Evaluation*" del Flow3d

- “*Heat transfer*”:

Pel que fa a la transferència de calor, s'activa per aportar més realisme al llarg del temps de simulació, tot i que no ens interessa les temperatures generades a efectes pràctics, però són propietats físiques reals que cal tenir activades per tal de que la simulació sigui realista. Les opcions que cal activar per la transferència de calor són les que s'observen en la figura 18:

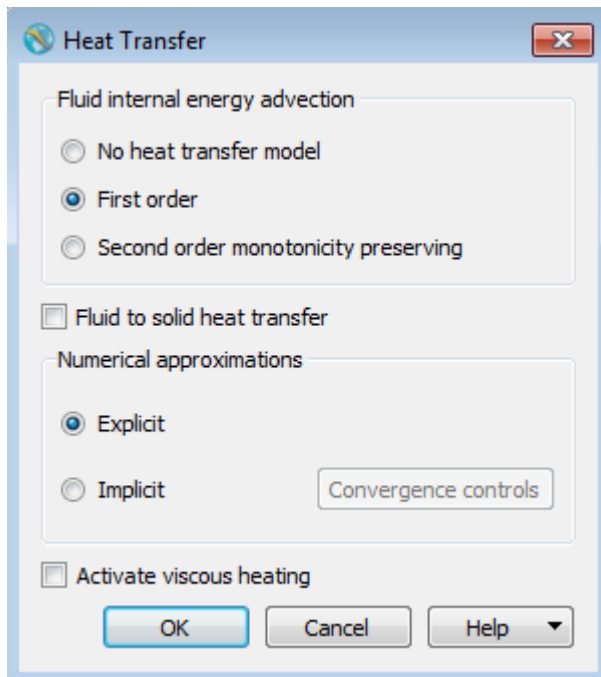


Figura 18. Pestanya de “*Heat Transfer*” del Flow3d

- “*Viscosity and Turbulence*”:

En referència a la viscositat i turbulència, ja que la simulació es tracta d'un túnel de vent, cal tenir en compte la viscositat de l'aire i la turbulència generada al llarg del túnel.

És important fer ús del model de turbulència k-èpsilon ja que es tracta d'un model de dues equacions que té en compte l'energia cinètica de turbulència (k) i el ritme de dissipació de l'energia de turbulència (èpsilon). És un model especialment dissenyat per a superfícies tallants planes el qual és ideal per a la nostra simulació.

La finestra de viscositat i turbulència cal configurar-la tal i com es veu en la figura 19:

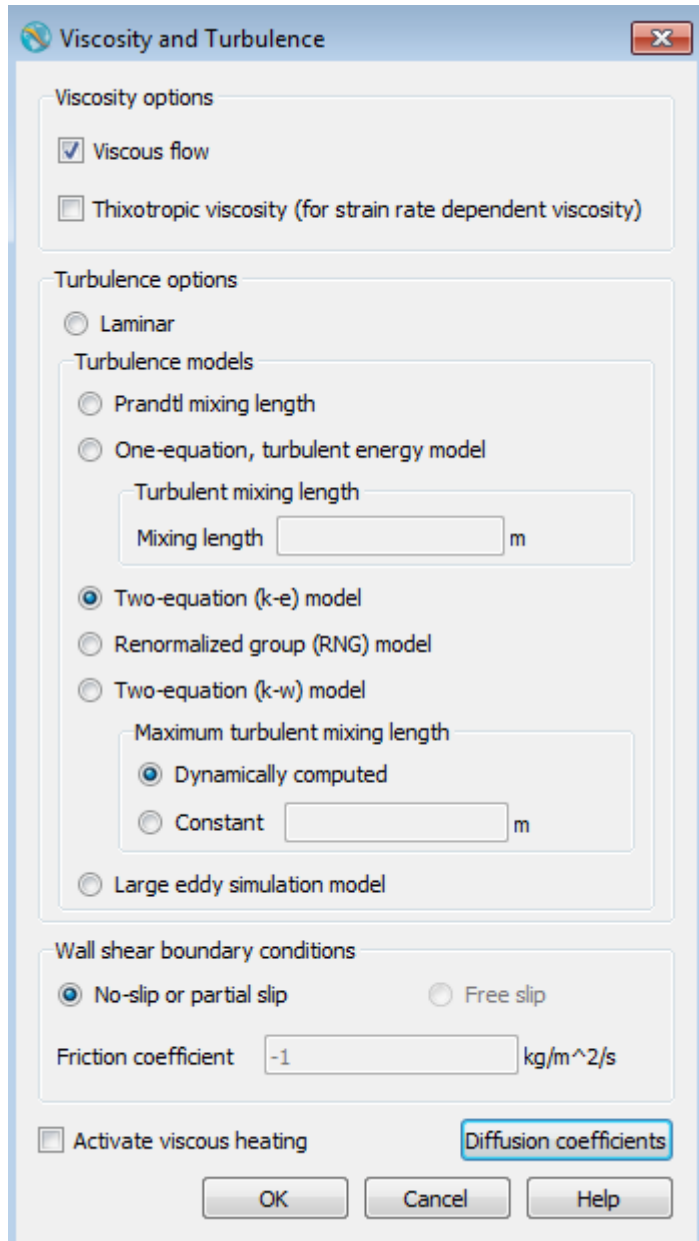


Figura 19. Pestanya de "Viscosity and Turbulence" del Flow3d

En resum, aquestes 3 propietats físiques són les necessàries per dur a terme les simulacions de manera efectiva. Cal que totes les altres opcions estiguin desactivades ja que per una simulació d'aire en moviment no són adequades ni necessàries.

Un cop configurades les pestanyes anteriors, cal comentar que propietats com la gravetat tenen efectes completament menyspreables i no cal activar-les. Pel que fa la pestanya de vent, no es aplicable a aquest model, ja que en el Flow3d la opció "vent" afecta al fluid com a tal, no a parets, sòlids, etc.

### 4.3. Fluids

La tercera pestanya correspon a la de "Fluids", i és on s'estableixen les propietats del fluid o fluids en qüestió, en aquest cas, només hem de definir un fluid, que és aire a pressió atmosfèrica i a una temperatura adequada de treball.





Per tant, fent clic amb el botó dret a "Fluid 1" i seleccionant l'opció "*Load Properties*", podem carregar automàticament totes les característiques de l'aire atmosfèric a 15°C les quals són:

- Densitat:  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- Viscositat dinàmica:  $\mu = 1.789 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Calor específica:  $C = 718 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- Conductivitat tèrmica:  $k = 0.02346 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Si es desitja tenir unes propietats diferents de l'aire, un cop carregades es poden modificar segons convingui, per tal de simular en temperatures diferents, pressions diferents, etc.

### 4.4. Mallat i geometria

En la quarta pestanya, "*Meshing & Geometry*", s'hi defineix tot el conjunt 3D del model, en la part esquerra del monitor tenim la barra amb una sèrie d'icones, les quals només ens interessen les quatre primeres, aquestes es mostren a les de la taula 2:

Icona	Significat
	Geometria i propietats dels components
	Mallat
	Condicions de contorn
	Condicions inicials

Taula 2. Icones de la pestanya "*Meshing & Geometry*" del Flow3d

#### 4.4.1. Geometria i propietats dels components

En aquest apartat, hi importarem el perfil alar i el col·locarem a l'origen de coordenades, posteriorment, en la pestanya de condicions de contorn, ja establim les mides del túnel, parets, entrada d'aire etc. De manera que, un cop obert el menú de geometria, podem

començar a definir el primer component. Tal i com es veu en la figura 20. Introduïrem les següents dades:

- Nom: En aquest l'anomenarem "Perfils alars" on posteriorment s'hi poden importar els perfils alars concrets.
- Material: Aprofitant la llibreria de materials que tenim, es carreguen les propietats d'un material coherent per als perfils, com és l'Acer AISI P-20.
- Tipus de component: Sòlid.

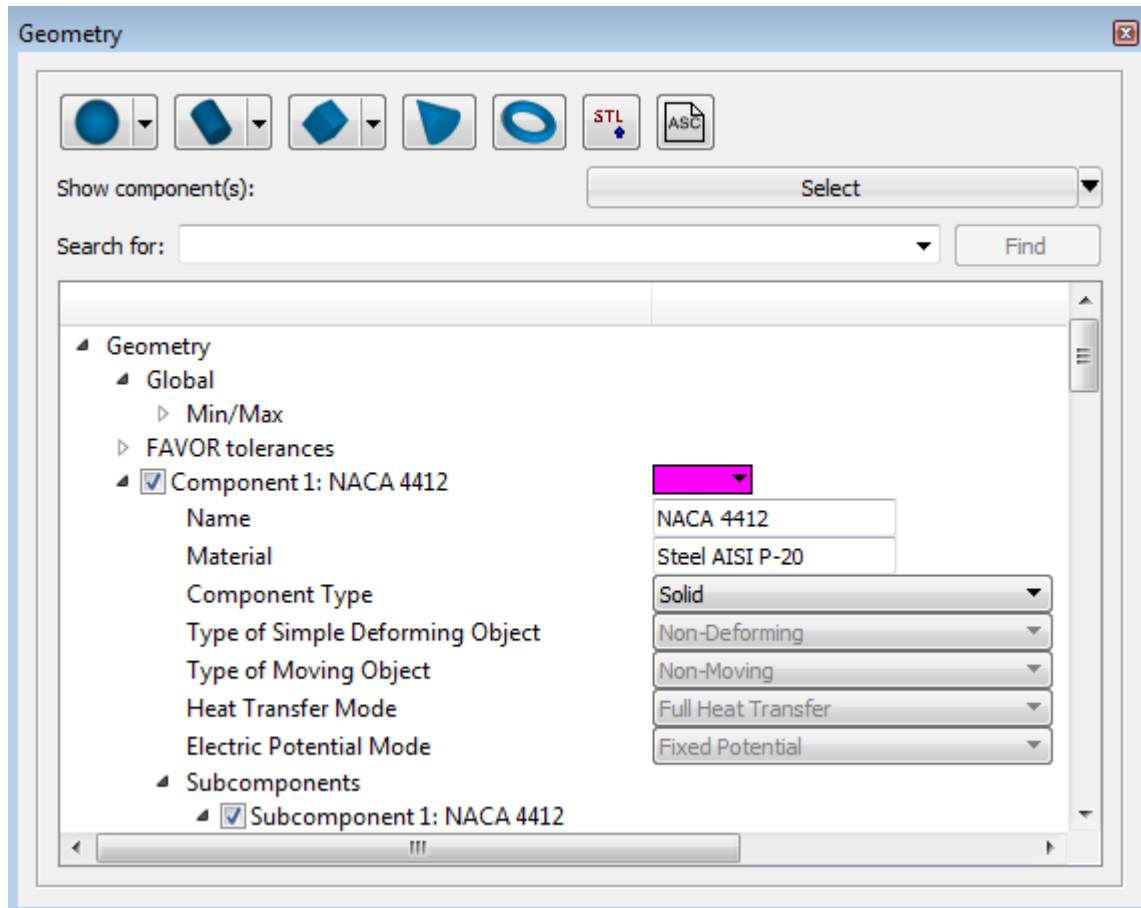


Figura 20. Configuració del primer component de geometria del Flow3d

Un cop definides les característiques anteriors, ara cal de carregar la geometria del perfil alar, per dur-ho a terme, s'importa l'arxiu del perfil alar en format .STL, és possible importar-lo des de la icona anomenada "STL". Un cop importat el perfil, cal verificar que consta com a subcomponent del component 1 que hem definit anteriorment.

Mitjançant aquesta icona s'hi pot importar qualsevol fitxer .STL. Per tant si és d'interès simular altres perfils o cossos, es faria amb el mateix procediment descrit.

En aquest subcomponent, que es tracta del perfil alar, li definirem les següent propietats, tal com es mostra en la imatge 21:



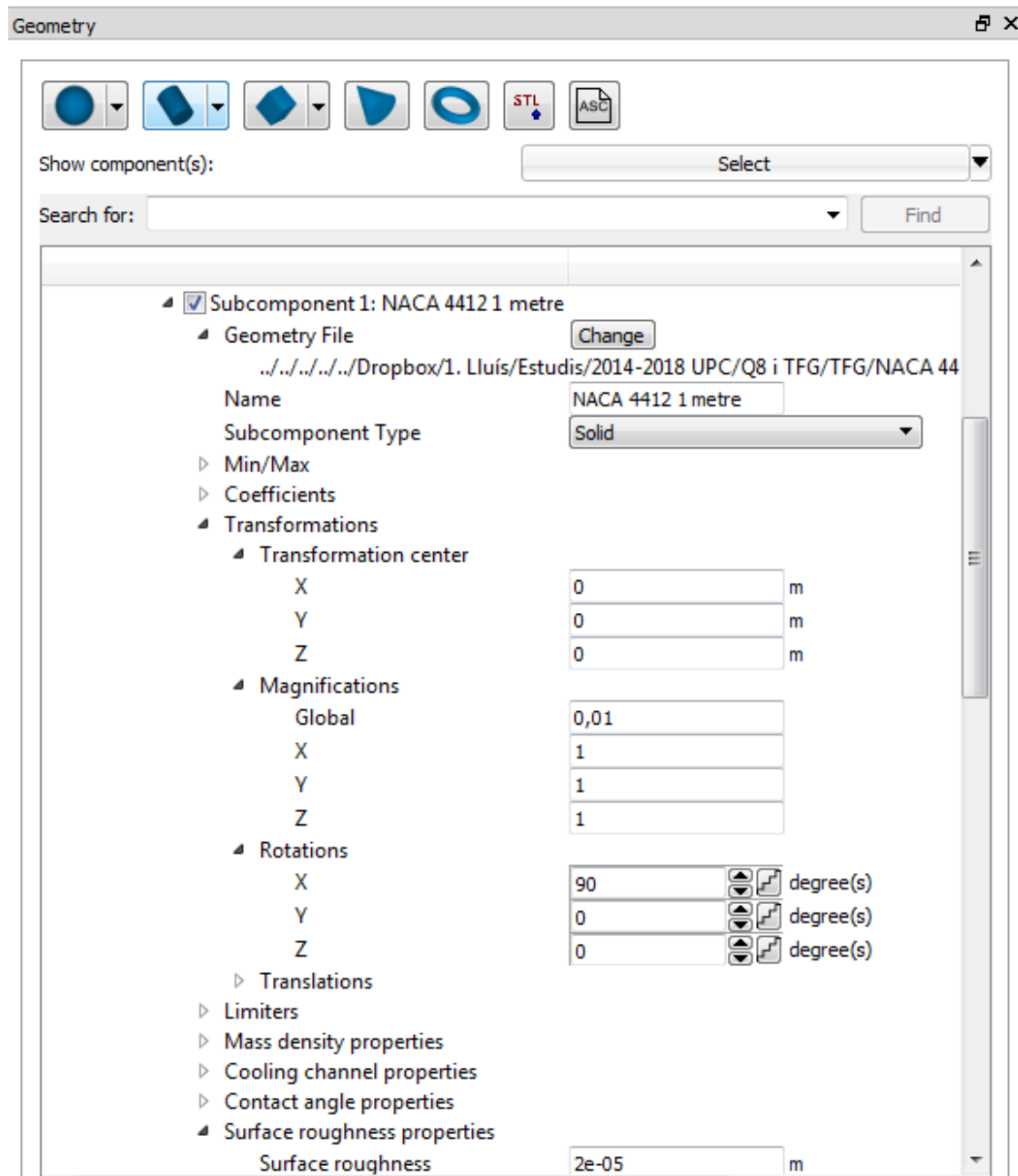


Figura 21. Configuració del primer subcomponent de geometria del Flow3d

- Nom: NACA 4412
- Tipus de subcomponent: Sòlid
- Transformacions (Seran úniques per a cada arxiu importat):
  - o Transformacions de centre: No és necessari mentre el sòlid apareix-hi en l'origen de coordenades o en unes coordenades còmodes per treballar, en cas contrari, se'n pot modificar la posició segons convingui.
  - o Magnificacions: Global: 0.01. Aquesta magnificació de l'arxiu importat té la funció d'adaptar l'escala i també la conversió d'unitats de l'arxiu al de flow3d, en aquest cas es de 0.01 per tal de fer la conversió d'unitats del SolidWorks a Flow3d.

- Rotacions: també dependran de cada arxiu importat, les següent són característiques de l'arxiu importat:
  - X: 90° (per tal de col·locar el perfil en horitzontal i paral·lel al terra)
  - Y: 0° (**Angle d'atac**)
  - Z: 0° (El perfil ja apareixia correctament posicionat respecte l'eix Z)
- Propietats de rugositat de la superfície: 0.00002mm

Seguidament, per tal de millorar la precisió dels resultats, definirem una component de mallat. Es tracta, bàsicament, d'un volum que després configurarem per tal de que les zones properes al perfil en qüestió tinguin un mallat més precís. Per tant, es crea un component 2, el qual tindrà les següent característiques:

- Nom: "Mallat millorat"
- Tipus de component: "*Meshing*". Ja que l'objectiu d'aquesta component és la definició d'un mallat millor a prop del perfil.

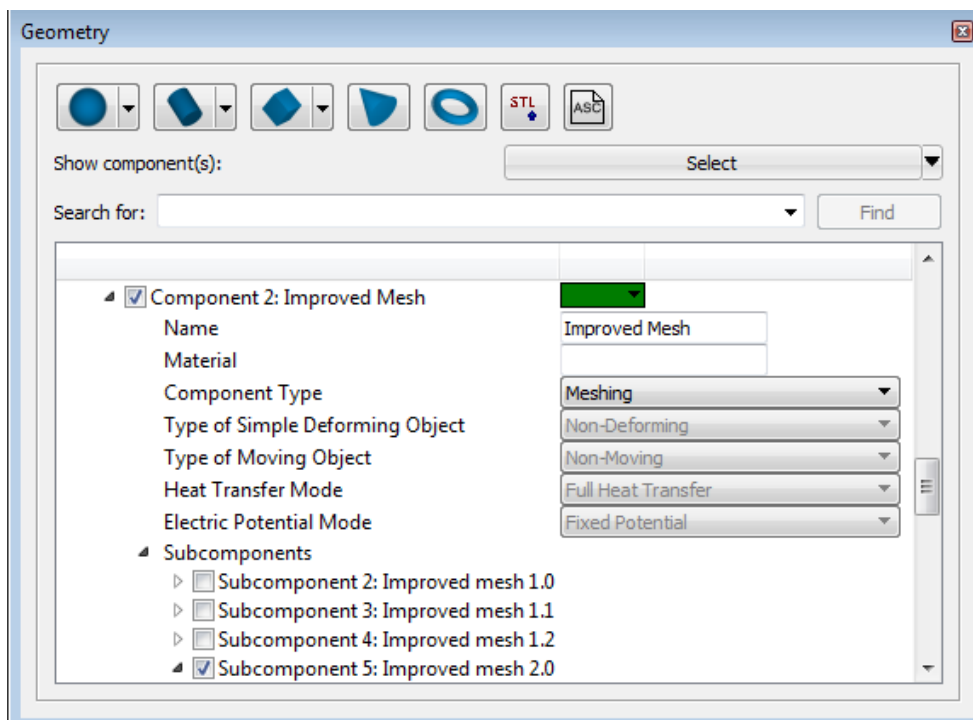


Figura 22. Configuració de la segona component de geometria del Flow3d

A l'hora de definir els subcomponents, se'n poden definir varis, depenent de l'angle d'atac i la mida del perfil en qüestió. La definició de qualsevol d'aquests és molt semblant a les següents característiques:

- Nom: "Mallat millorat 1"
- Tipus de subcomponent: Sòlid (el tipus de subcomponent deixa escollir entre sòlid o forat, és la manera que com interpreta el flow3d els espais plens o buits, per tant s'escull l'opció de "Sòlid").

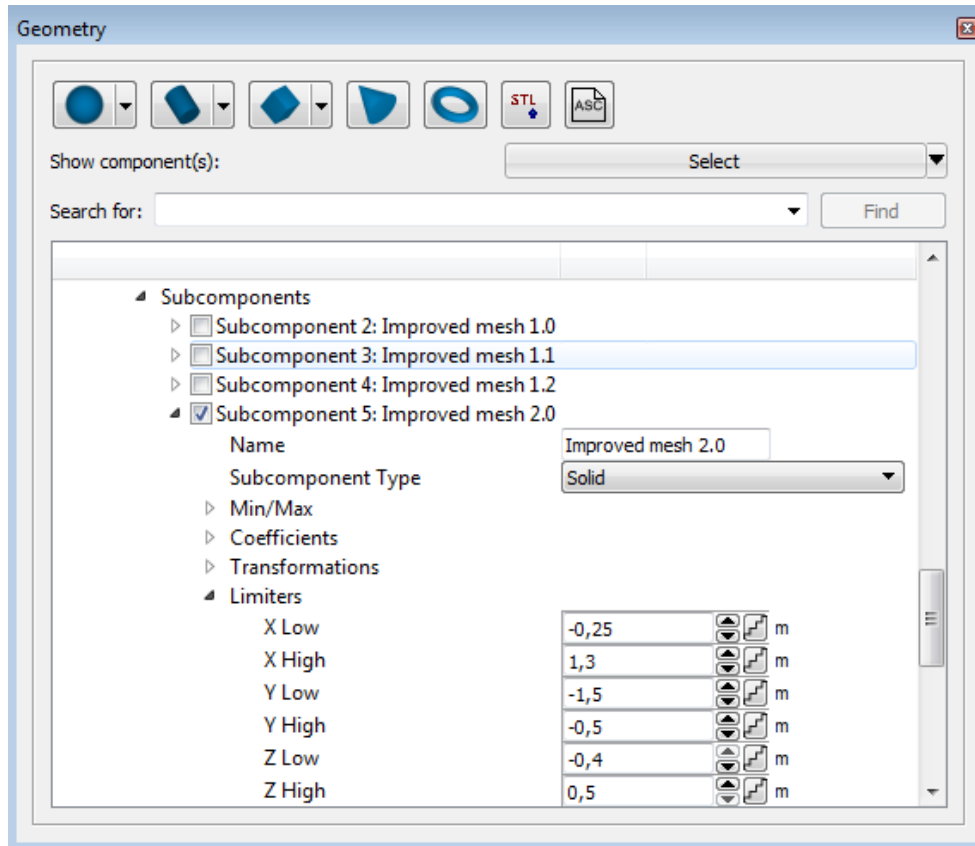


Figura 23. Configuració dels altres subcomponents de geometria del Flow3d

Tal i com s'observa en la figura 23, els "*Limiters*" defineixen el volum d'aquest subcomponent que es poden definir a ull observant el conjunt 3d i com delimita la zona propera al perfil. Com és obvi, aquest volum es personalitza en funció de cada simulació i per cada perfil. Un cop definit, ha de quedar una regió semblant la de la figura 24:

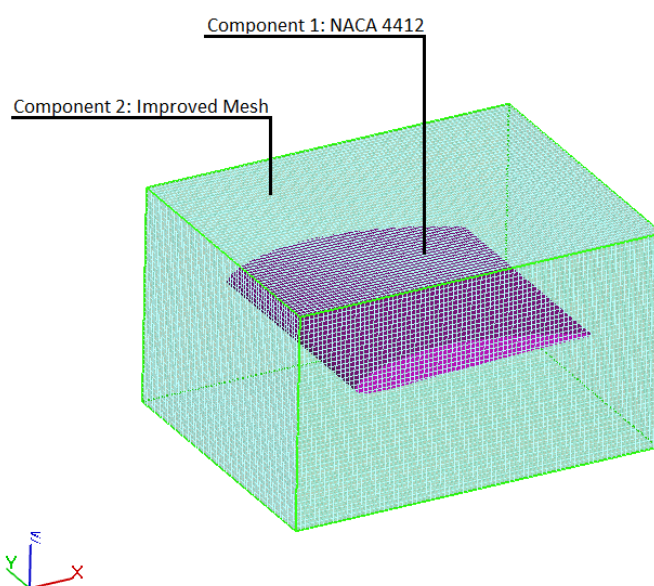


Figura 24. Exemple del conjunt 3D dels dos components de geometria

Just a la part inferior de la finestra “Geometry”, apareix la de “Component properties”, aquestes dues van fortament relacionades. En la de propietat dels components cal definir unes característiques més:

Cal establir per als dos components les següents propietats:

- Output:
  - Activar l'output de pressió i força tallant (per tal d'estudiar els esforços generats per al fluid en el post-processament.
  - Especificar que la pressió de referència ve definida
- Propietats de les superfícies (valors coherents per als perfils alars):
  - Coeficient de fricció estàtic:  $0.2 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$
  - Rugositat:  $0.00002 m$

Fins aquí la definició de la geometria i propietats dels components, cal remarcar que, per fer un túnel amb parets rectangulars, es poden definir des dels apartats que venen a continuació, el <4.4.2. Mallat> i el <4.4.3. Condicions de contorn>.

Però, si es volgués fer un túnel amb parets de formes diferents, per exemple, de forma cilíndrica, es podria crear una geometria amb les icones que apareixen en la finestra de “Geometry” que són les següents:



Figura 25. Icones de geometria del Flow3d

I també cal definir aquestes geometries com a components sòlides, de manera que farien la funció de paret. Com que aquestes característiques les defineix l'usuari, permet crear túnels de vent de un ampli rang de mides, es recomana com a mides mínimes a partir de mig metre i com a mides màximes varis metres, ja siguin d'amplada, altura, o llargada, de manera que permet crear un model virtual escalable dins d'un rang de mides coherents tal i com s'ha definit en l'apartat <1.2. Abast del projecte i limitacions>.

#### 4.4.2. Mallat

En la pestanya de mallat s'hi defineixen els volums de control i també la mida de les cèl·lules en el que els volem dividir. Per tal de garantir un mallat efectiu i coherent amb el túnel de vent es defineixen els següents volums:

- Mallat bàsic. Volum total del túnel: Mides exactes (les mateixes que s'han definit a l'apartat de <3. Definició dels paràmetres inicials>:
  - Llargada:  $10 m$
  - Amplada:  $4 m$

- Alçada: 2 m
- Aresta de cada cèl·lula: 0.03 m

Aquestes mides són pel model d'aquest projecte, els límits d'aquest volum s'hi definiran les condicions de contorn. Cal remarcar que, en el cas que les parets vinguin donades per un sòlid creat per l'usuari, caldrà definir aquest volum de manera que tingui l'abast d'incloure els sòlids creats o importats.

- Mallat millorat ("*Improved Mesh*"). Volum proper al perfil a provar: Mides aproximades:
  - Llargada: 1.55 m
  - Amplada: 4 m
  - Alçada: 0.9 m
  - Aresta de cada cèl·lula: 0.015 m

Aquestes mides del mallat millorat han de ser iguals a les mides i en la posició del component 2 que hem definit. Aquest mallat millorat és necessari per obtenir resultats més precisos i a l'hora no sobrecarregar el model amb un mallat massa petit, ja que no és necessari a tot el volum del túnel.

Així doncs, les característiques del mallat en el Flow3d són les següents:

Mallat bàsic: tal com es veu en la figura 26, es defineix el Volum gran com a "Túnel de vent" i s'especifica que el tipus de mallat és el següent: "*Mesh type: Conform to open volume*" ja que no volem que s'adapti a cap superfície si no al volum obert que volem estudiar. A més a més, cal especificar els plans que limiten aquest volum d'acord amb les mides que hem definit anteriorment, així com la mida de cèl·lula: 0.03 metres. Aquesta mida és suficient per estudiar amb precisió tot el túnel menys la regió propera al perfil.

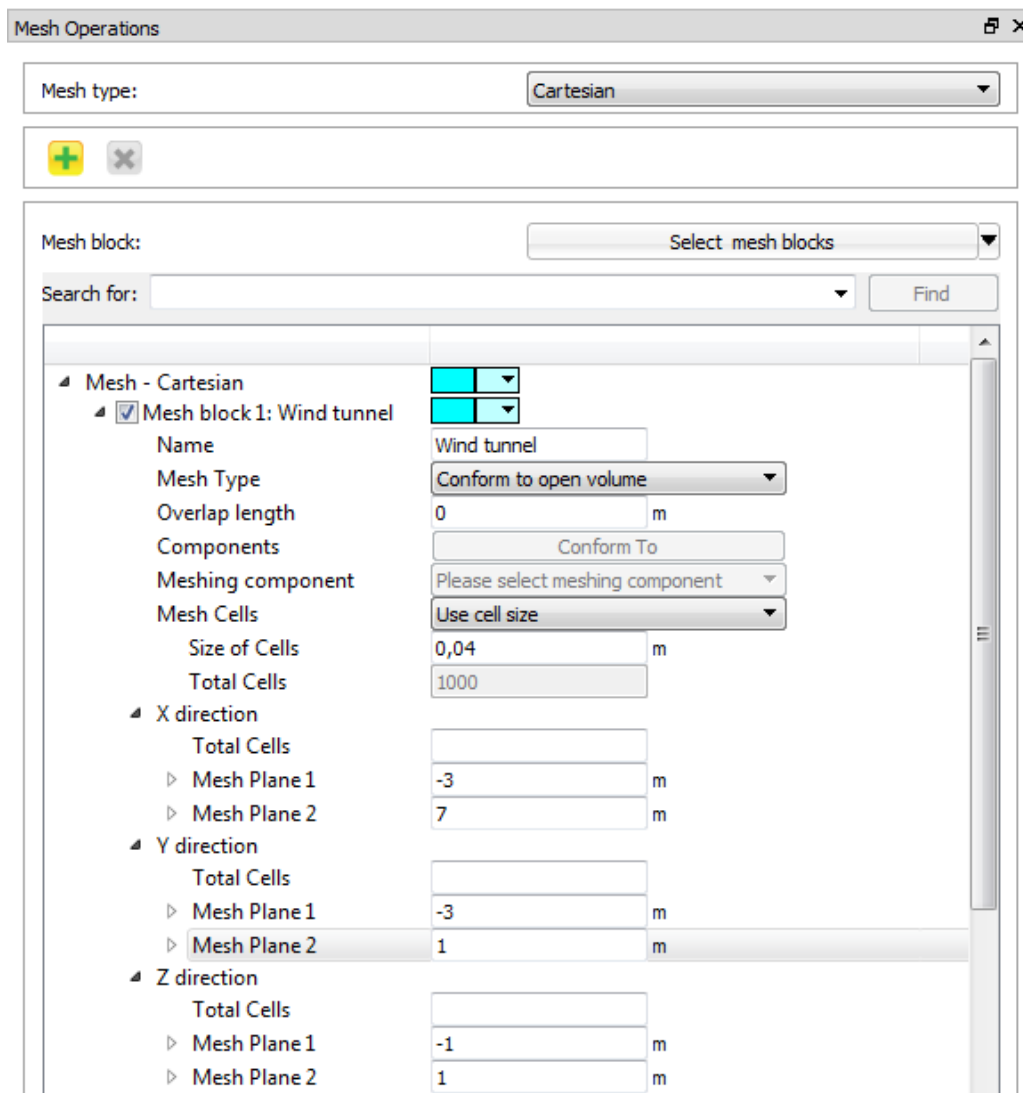


Figura 26. Configuració del mallat general del Flow3d

Mallat millorat específic: tal i com s'observa en la figura 27, aquest mallat l'anomenem "*Improved Mesh*" i cal especificar que s'adapti a un component de mallat (el que s'ha definit a l'apartat de geometria): "*Mesh type: Conform to meshing component*". I es defineixen els plans que delimiten aquest volum d'acord amb les mides especificades a l'apartat anterior i la mida de les cèl·lules de 0.015 metres. La mida de les cèl·lules en qualsevol simulació no poden ser mai més de 2 vegades més grans entre elles, per tant no es pot definir inferior a 0.015 metres, ja que el mallat bàsic té un mida de cèl·lula de 0.03 metres.

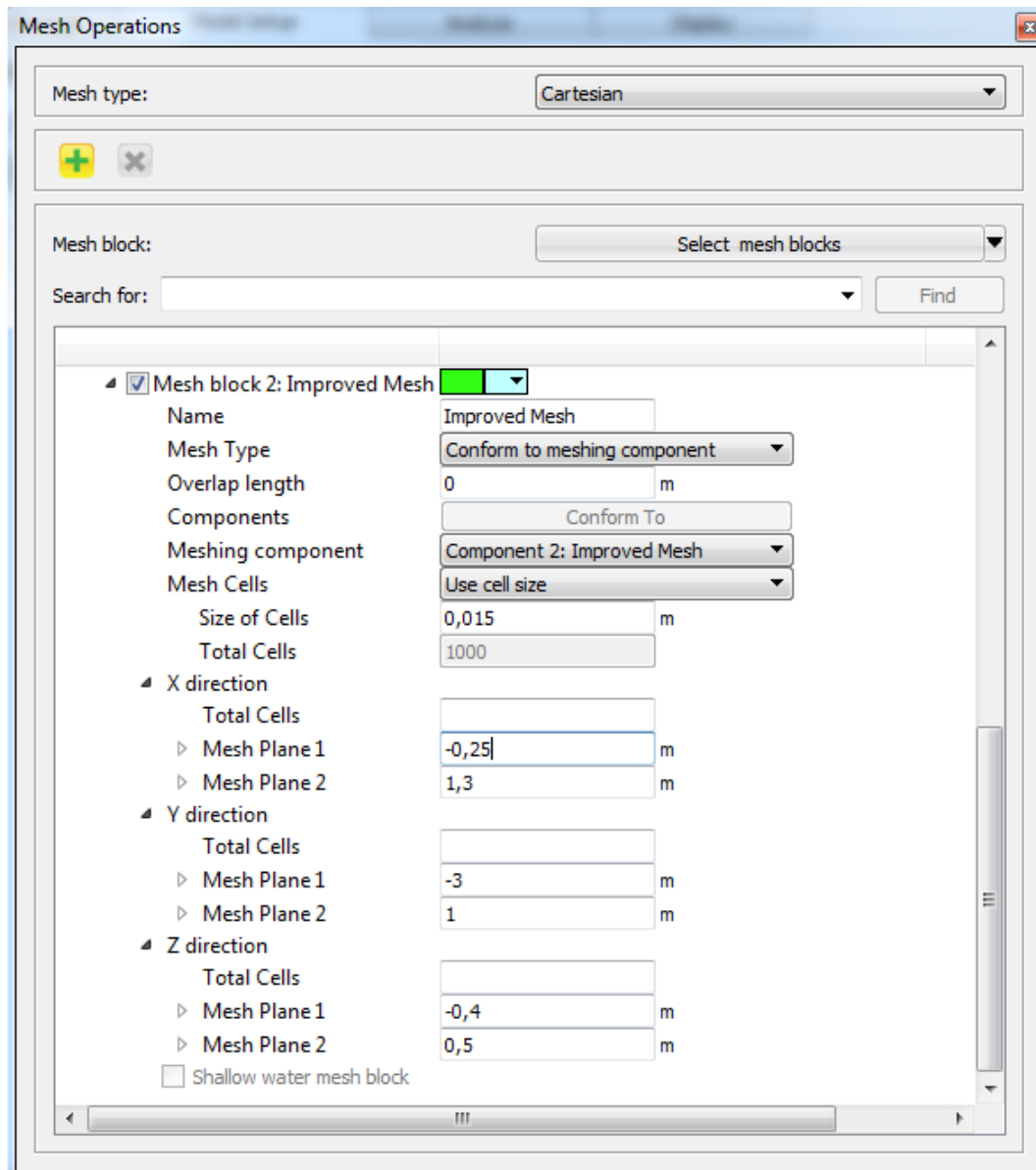


Figura 27. Configuració del mallat específic del Flow3d

Com a dades que cal destacar, el mallat general genera  $2.9673 \cdot 10^6$  cèl·lules, i el mallat específic millorat en genera  $1.6500 \cdot 10^6$ . De manera que el model compta amb més de 4 milions cèl·lules de mallat. Abans de simular es verifica la correcta definició del mallat de manera que s'hi pot confiar.

Les posicions dels plans de cada bloc de mallat estan d'acord amb les mides definides just abans. De manera que el model té la forma aproximada que es mostra en la figura 28:

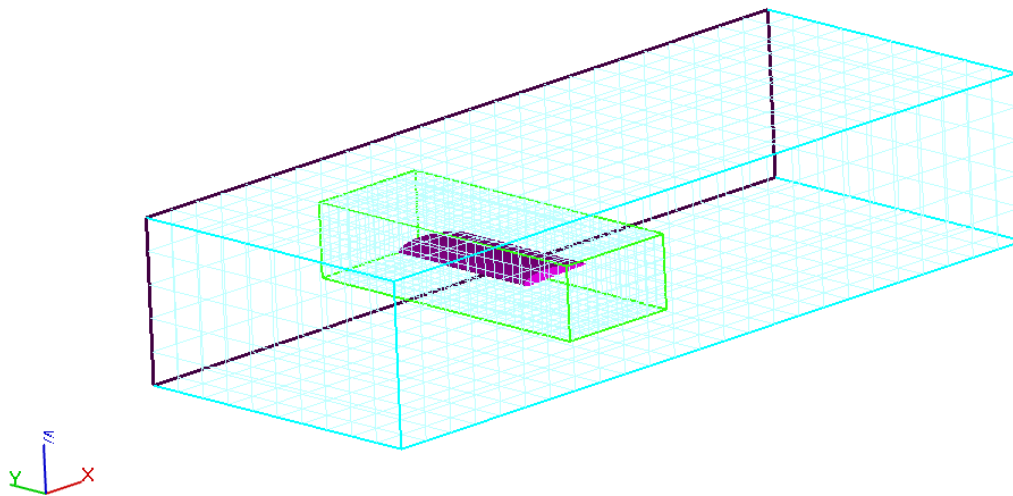


Figura 28. Exemple de conjunt 3D dels blocs de mallat

On es veu clarament la bona col·locació del perfil alar, rodejat pel mallat millorat (en verd) i el mallat general (en blau clar) ocupa les mides descrites del túnel de vent. Cal remarcar que per visualitzar millor aquest conjunt 3D de la figura 28 s'ha fet un mallat molt gran per tal de que s'observi el seu interior adequadament, els mallats reals quasi no deixarien veure l'interior del volum degut a la gran quantitat de cèl·lules que es generen.

#### 4.4.3. Condicions de contorn

En referència a les condicions de contorn cal tenir en compte que van directament relacionades amb els blocs de mallat que s'han definit, per tan caldrà definir aquestes condicions per al mallat "Túnel de vent" i el "Mallat millorat".

Per al mallat "Túnel de vent" l'hi definirem els paràmetres de la taula 3:

Plans del mallat "Túnel de vent"	Tipus de contorn " <i>Boundary type</i> "	Valor
X Min	<i>Specified velocity</i>	14.38 m/s
X Max	<i>Specified pressure</i>	$1.0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Y Min	<i>Wall</i>	-
Y Max	<i>Wall</i>	-
Z Min	<i>Wall</i>	-
Z Max	<i>Wall</i>	-

Taula 3. Condicions de contorn del mallat general



Referent a la taula 3, cal destacar que el pla “X min” és per on entra l'aire a una velocitat de 14.38 m/s tal i com s'ha calculat prèviament, Al pla “X max” és per on surt l'aire de manera que apliquem pressió atmosfèrica de 1 bar ( $1.0 \cdot 10^5 Pa$ ). I els altres plans es defineixen com a parets on el software ja tindrà en compte les condicions de capa límit del fluid. Aquesta última opció és precisament la que permet no haver de importar cap geometria de paret en l'apartat <4.4.1. Geometria i propietats dels components> ja que tal com s'ha explicat es pot definir els límits dels volums de mallat com a parets, i això és possible sempre que siguin superfícies planes i rectangulars.

Pel que fa al bloc 2 “Mallat millorat”. Definirem els paràmetres que s'observen a la taula 4:

Plans del bloc 2	Tipus de contorn “ <i>Boundary type</i> ”	Valor
X Min	<i>Grid overlay</i>	-
X Max	<i>Grid overlay</i>	-
Y Min	<i>Grid overlay</i>	-
Y Max	<i>Grid overlay</i>	-
Z Min	<i>Grid overlay</i>	-
Z Max	<i>Grid overlay</i>	-

Taula 4. Condicions de contorn del mallat específic

El tipus de contorn de superposició de mallat “*Grid overlay*” que s'observa a la taula 4 és necessari per tal de unir els dos blocs de mallat que hem creat de manera que queden cosits l'un amb l'altre.

Un cop definides totes les condicions de contorn el menú queda tal com s'observa continuació en la figura 29:

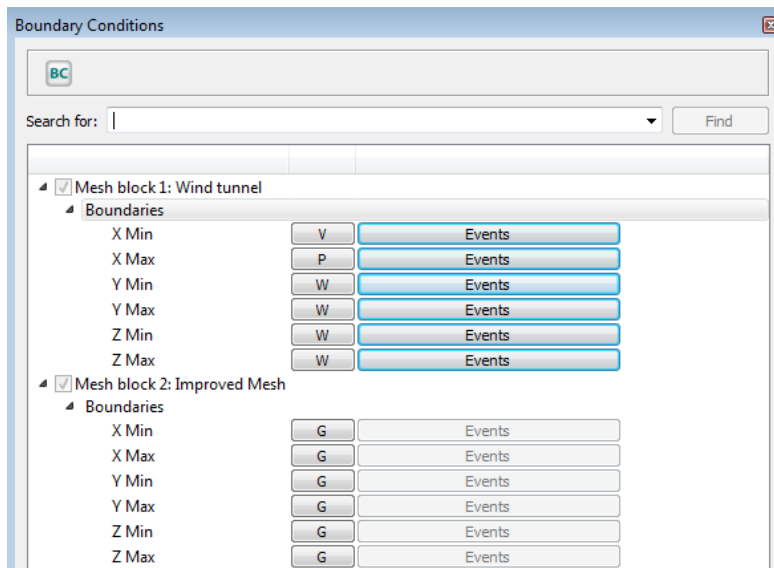


Figura 29. Configuració de la pestanya de condicions de contorn del Flow3d

#### 4.4.4. Condicions inicials

El menú de condicions inicials es divideix en dues parts, les condicions inicials globals i les condicions inicials de la regió del fluid en qüestió. De manera que, les condicions inicials globals són les que es mostren en la figura 30:

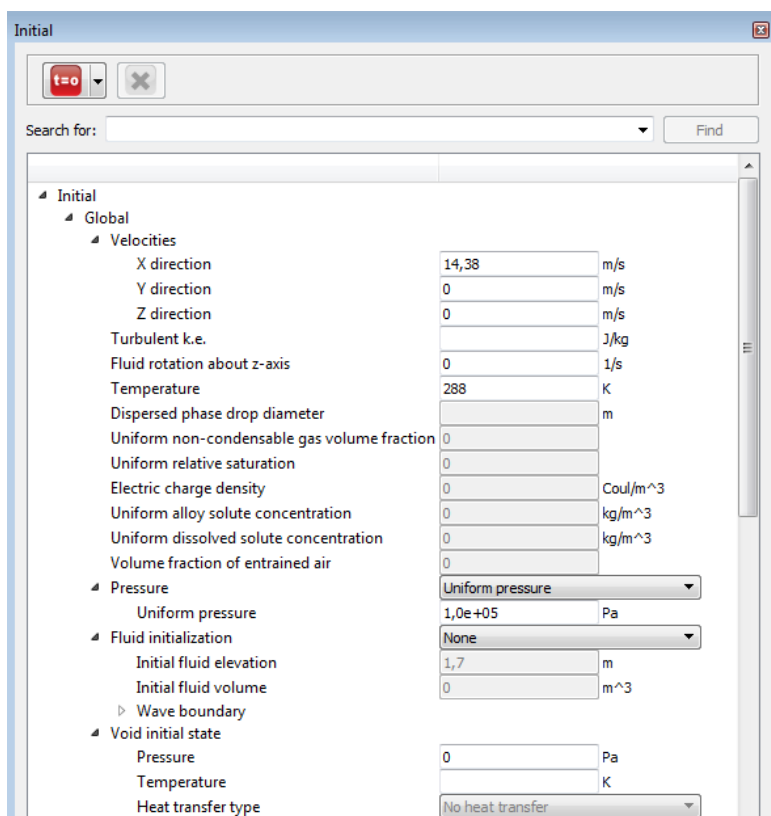


Figura 30. Configuració de la pestanya de condicions inicials del Flow3d (1)

De manera que cal especificar, tal i com ses veu en la figura 30, que la velocitat inicial en l'eix "X" és de 14.38 m/s de manera que la simulació ja parteix d'un model coherent d'un túnel de vent, ja que l'aire ja va a la velocitat desitjada des d'un bon començament. Com és obvi, és necessari definir que en l'eix Y i Z les velocitats són nul·les. A més, la pressió inicial la definim atmosfèrica ( $1.0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ).

En referència a les condicions inicials de la regió de fluid, en aquest model només existeix una única regió del fluid, ja que només tenim aire i en només una regió. En la figura 31 es veu com queda definida la regió de fluid, se l'hi dona el nom de "*Fluid region 1: Air at 15 degrees C*" i s'hi especifica una temperatura inicial de 15°C (288 K) d'acord amb les propietats del fluid.

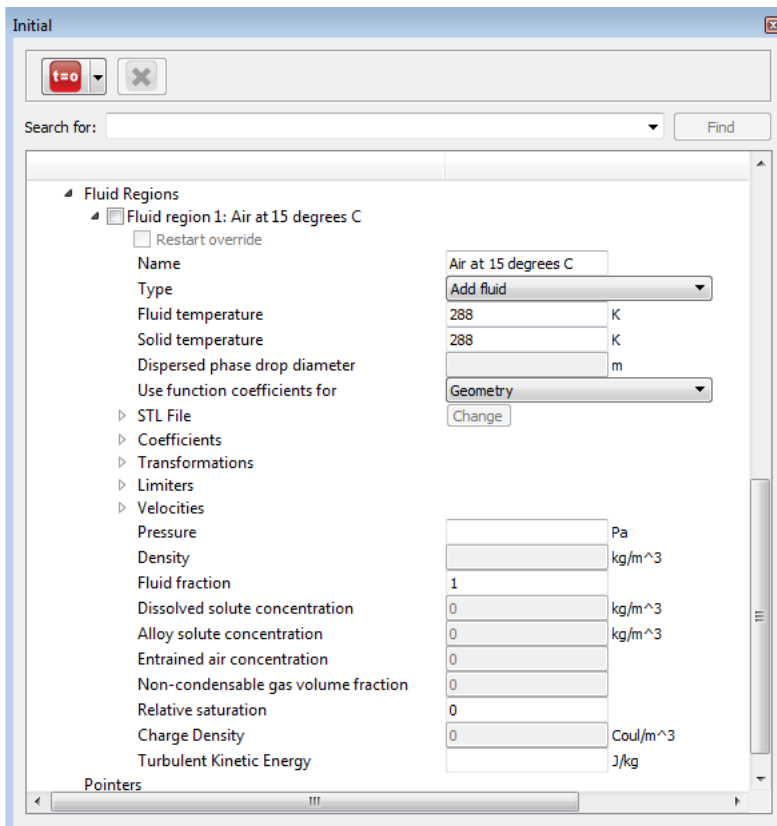


Figura 31. Configuració de la pestanya de condicions inicials del Flow3d (2)

## 4.5. Output

En la pestanya d'output, cal fer lleugeres modificacions respecte les que venen per defecte. És important especificar les següents opcions:

- Base de l'output: Temps
- Interval màxim de temps transcorregut: 10 segons
- "*Data selected*": 0.5 segons (de manera que podrem post-processar amb dades cada mig segon, més que suficient ja que ens interessa l'estat últim un cop la simulació s'ha estabilitzat).

També cal tenir activat els següents outputs, ja que són d'interès per a comprovar els resultats i dur a terme el post-processament:

- Velocitat de deformació del fluid
- Velocitats del fluid
- Densitat macroscòpica
- Ritme d'origen de massa
- Pressió

De manera que la part central de la pestanya d'output ens queda tal i com s'observa a la figura 32:

Selected data

☐ Selected data interval 0,5 s

Fraction interval: 0,01

Events

- ☐ Excess shear stress
- ☐ Fluid fraction
- ☒ Fluid strain rate
- ☐ Fluid temperature
- ☒ Fluid velocities
- ☐ Internal energy
- ☒ Macroscopic Density
- ☒ Mass source rate
- ☐ Particle information (for 2D and 3D plots)
- ☒ Pressure
- ☐ Turbulent quantities (tke/dtke)

Figura 32. Configuració de la pestanya d'output del Flow3d (1)

Per últim, és necessari tenir activats els outputs addicionals següents a la part dreta de la pestanya d'output, tal i com es veu en la imatge 33:

- Ritme de deformació.
- Esforç tallant: per tal d'estudiar com pateix el perfil i quines forces es generen.

Additional output

- ☐ Dynamic viscosity
- ☐ Fluid tracer(s)
- ☐ Fluid vorticity & Q-criterion
- ☒ Strain rate
- ☐ Total hydraulic head 3D
- ☐ Hydraulic data (depth averaged values and assuming gravity in -Z direction)
- ☒ Shear stress

Figura 33. Configuració de la pestanya d'output del Flow3d (2)

## 4.6. Numèrics

En l'última pestanya, anomenada “*Numerics*”, també cal modificar lleugerament les opcions que venen per defecte, cal definir els següents paràmetres per a un desenvolupament de la simulació correcta tal i com es mostra en la taula 5:

Paràmetre	Valor o especificació
<i>Minimum time step</i>	$1.0 \cdot 10^{-8} \text{ s}$
<i>Maximum time step</i>	$1.0 \cdot 10^{35} \text{ s}$
<i>Pressure solver points</i>	<i>Implicit</i>
<i>Viscous stress solver options</i>	<i>Explicit</i>
<i>Heat transfer, advection</i>	<i>Explicit</i>
<i>Volume-of-fluid advection</i>	<i>Automatic</i>
<i>Fluid flow solver options</i>	<i>Solve momentum and continuity equation</i>

Taula 5. Paràmetres de la pestanya de numèrics

## 4.7. Simulació

Un cop completada la definició del model, ja es pot procedir a fer les simulacions. Que, per tal de tenir dades concretes per a cada angle d'atac, se'n fan 5 de diferents, per angles d'atac de  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  i  $10^\circ$ . Per exemple, si és comença per la de  $-10^\circ$ , aquest angle es defineix en la component número 1 de geometria i és la rotació respecte l'eix Y (veure apartat <4.4.1. Geometria i propietats dels components>).

A l'hora de fer la simulació, sempre es fa seguint els tres passos següents:

- “*Simulation Pre-check*”: on es comprova que el model sigui viable i es pot veure el nombre de volums finits que s'han generat en el procés de mallar i, si hi hagués algun tipus de problema, es pot solucionar en la majoria de casos des de la mateixa finestra. Si no és el cas, cal canviar aspectes del “*Model Setup*”.
- “*Pre-processor*”: on, entre altres, s'hi fa una estimació de la mida dels arxius de solució que es generaran al fer la simulació, aquests arxius solen ocupar des de 0.5 GB fins a 4 GB o més en simulacions més complexes del túnel.
- “*Run simulation*”: On s'envien les dades del model al servidor i es duu a terme la simulació, es pot tenir una idea aproximada del temps que tardarà en completar-se ja que es mostra en pantalla periòdicament, aquest temps sol ser d'entre 12 hores fins a varis dies. Un cop s'acaba la simulació ja es descarreguen els resultats automàticament i ja s'hi pot accedir a treballar.

Un cop descarregats els resultats de la simulació ja es pot procedir a fer les simulacions per a altres angles d'atac. Per això, es crea una còpia de la simulació que ja s'ha fet, se li canvia el nom, se li defineix el nou angle d'atac i ja es pot simular, sempre fent els 3 passos esmentats anteriorment. Per tal de crear la còpia, es fa clic dret sobre la simulació que es vol copiar i es selecciona l'opció de "*Add Simulation Copy*".

De manera que s'obtenen les simulacions desitjades per als 5 angles d'atac.

## 5. POST-PROCESSAMENT

Un cop en possessió dels arxius de totes les simulacions per al perfil alar NACA 4412 ja es pot començar amb el post-processament. El qual es durà a terme tot des del Flow3d, ja que l'objectiu és obtenir les forces generades pel fluid a l'entrar en contacte amb el perfil alar, i aquestes forces es poden obtenir amb facilitat des del post-processament que permet el Flow3d. Cal remarcar que si es necessitessin fer animacions complexes, veure certes zones en detall, etc. es faria utilitzant el FlowSight ja que és molt més potent a l'hora de post-processar.

Dins de la pestanya de "Analyze" del Flow3d, tenim un ventall de tipus de post-processaments, com variables en 1D, 2D, 3D, gràfiques, outputs de text, etc. A continuació s'expliquen els mètodes més útils per a simulacions de túnel de vent.

### 5.1. Contorns de pressió

Per tal de visualitzar el que ha anat passant al llarg de la simulació, es selecciona, en la pestanya "2D", una secció del pla XZ i es tria com a variable a visualitzar la pressió del flux. De manera que es mostra la gràfica 2D de la figura 34:

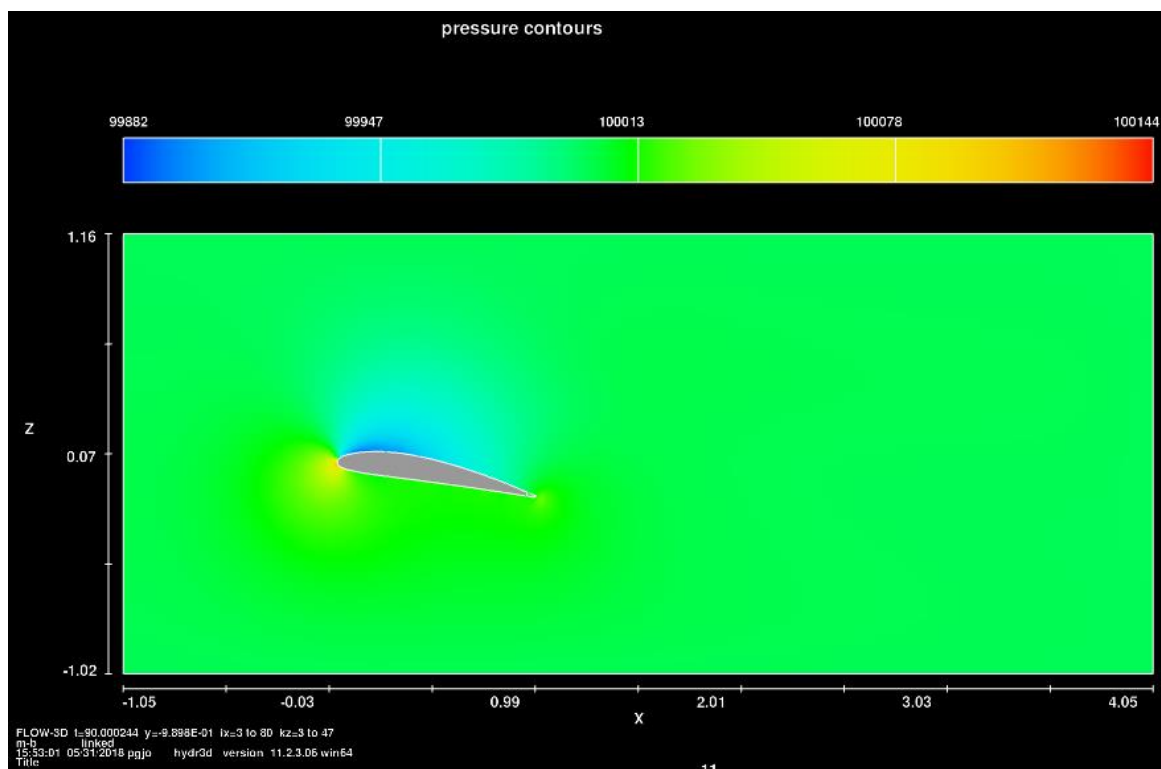


Figura 34. Contorns de pressió de la simulació per a un angle d'atac de  $+10^\circ$

En la figura 34 s'hi pot observar els valors de pressió (en l'estat últim de simulació quan  $t = 90 \text{ s}$ ) de la zona propera al perfil en una secció del túnel en el pla XZ on hi ha el perfil NACA 4412 amb un angle d'atac de  $+10^\circ$ . S'hi pot observar clarament una pressió baixa (en blau) a la superfície superior i una pressió alta (en verd) en la superfície inferior, aquesta diferència de pressió provoca la força de sustentació, tal i com s'ha explicat en l'apartat <2.3.1. Fluxos subsònics i perfils alars>.

## 5.2. Vectors de velocitat i la seva magnitud

Per acabar de verificar, a priori, un bon funcionament de les simulacions, també es verifiquen els valors de les velocitats del flux en les zones properes al perfil, tal i com es mostra en la figura 35. Aquesta gràfica 2D també es genera amb el mateix procediment que el de les pressions però seleccionant la variable de magnitud de velocitat.

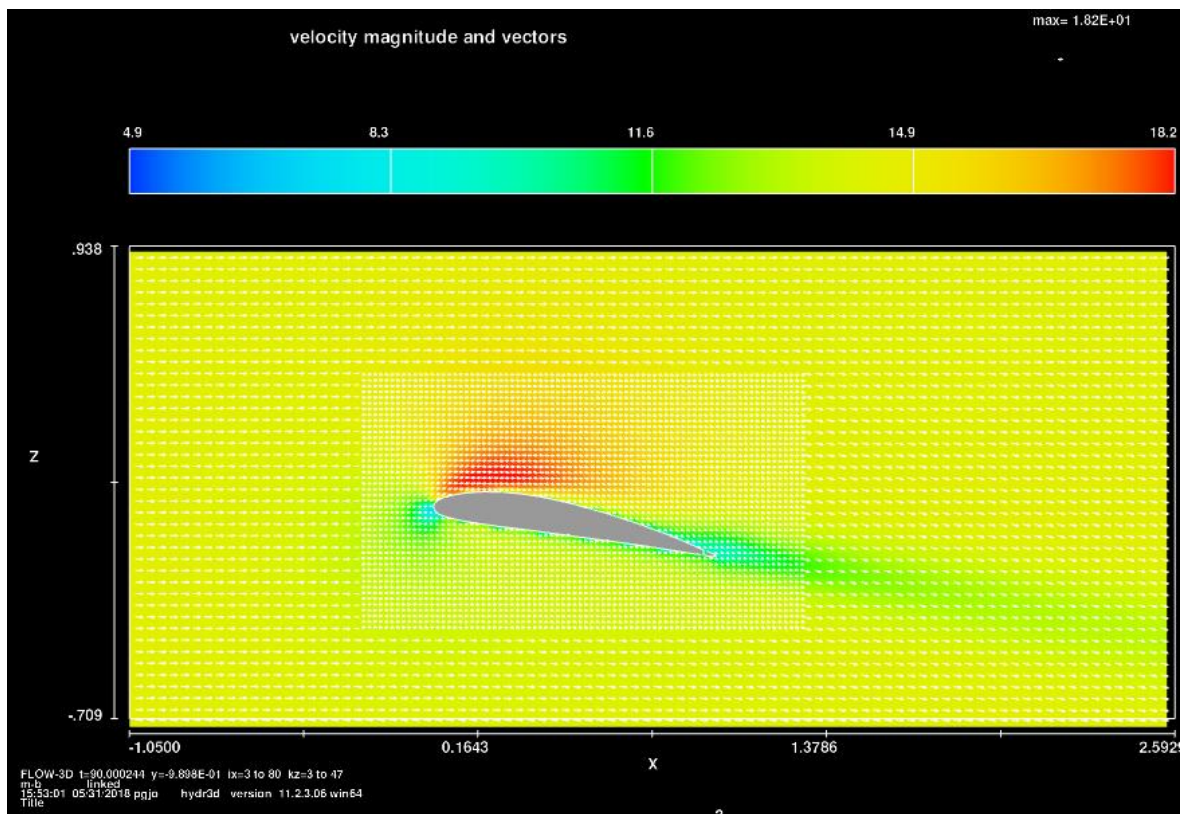


Figura 35. Velocitat del fluid de la simulació per a un angle d'atac de  $+10^\circ$

En la figura 35 hi ha representats els vectors de velocitat i els seus valors en la regió propera al perfil, aquest valors corresponen a la simulació del perfil NACA 4412 amb el mateix angle d'atac anterior,  $10^\circ$ . Tal i com s'observa, hi ha una gran velocitat a la superfície superior del perfil (fins a 18.2 m/s), que provoca la baixa pressió d'aquesta zona, cal tenir en compte que el túnel treballa a 14.38 m/s. També es pot observar amb claredat la poca velocitat en l'extrem d'atac i el de sortida, aquesta poca velocitat ve donada per l'increment de pressió



a l'extrem d'atac i a la poca pressió a l'extrem de sortida, provocant les forces de resistència aerodinàmica.

Un cop comprovat que les pressions i velocitats de la simulació tenen sentit i un valor molt coherent, ja es pot procedir a analitzar les gràfiques de les forces generades. Aquestes es troben dins la pestanya de "Probe" i seleccionant l'opció de "General history". Dins d'aquí cal seleccionar les següents opcions tal i com es mostra en la figura 36:

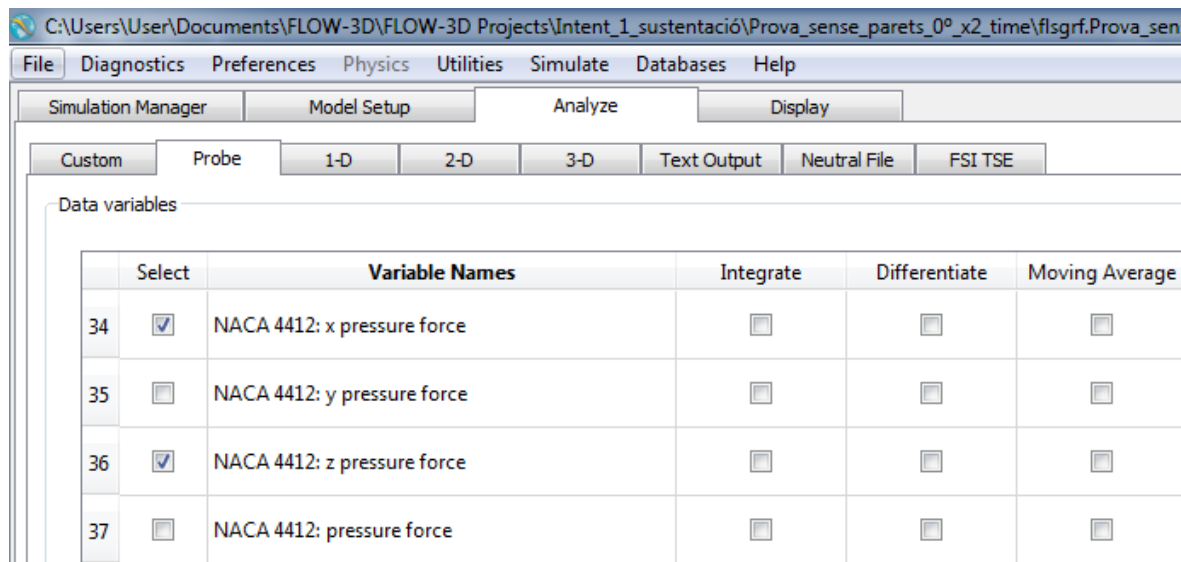


Figura 36. Configuració de la pestanya de "Probe" per obtenir les gràfiques de forces aerodinàmiques

Les opcions seleccionades corresponen a les següents:

- "X pressure force" correspon a la força generada sobre el perfil alar en la direcció de l'eix X, per tant aquestes són les forces de resistència generades.
- "Z pressure force" correspon a la força generada sobre el perfil alar en la direcció de l'eix Z, per tant aquestes són les forces de sustentació generades.

Si establim tota la durada de la simulació com a rang de temps a representar, i es fa clic a "Render", obtenim les gràfiques de les forces aerodinàmiques en funció del temps. Aquestes gràfiques es comenten a continuació per a cada angle d'atac, de  $-10^\circ$  fins a  $+10^\circ$ .

### 5.3. Forces aerodinàmiques del perfil NACA 4412

Primer de tot, és necessari esmentar que aquestes gràfiques són les obtingudes en el règim descrit en l'apartat <3. Definició dels paràmetres inicial> i <4. Pre-processament>, on es treballa amb un número de Reynolds de 1 milió i considerem un valor de la N crítica de 9. Per tant qualsevol simulació que no compleixi les característiques esmentades tindrà uns resultats diferents.

Així doncs, a continuació es presenten les forces aerodinàmiques del perfil NACA 4412 en el règim descrit anteriorment i per a diferents angles d'atacs,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+5^\circ$  i  $+10^\circ$  respectivament.

### 5.3.1. Angle d'atac de $-10^\circ$

Començant pel primer angle, a continuació és mostren les gràfiques de les forces aerodinàmiques per a un angle d'atac de  $-10^\circ$ .

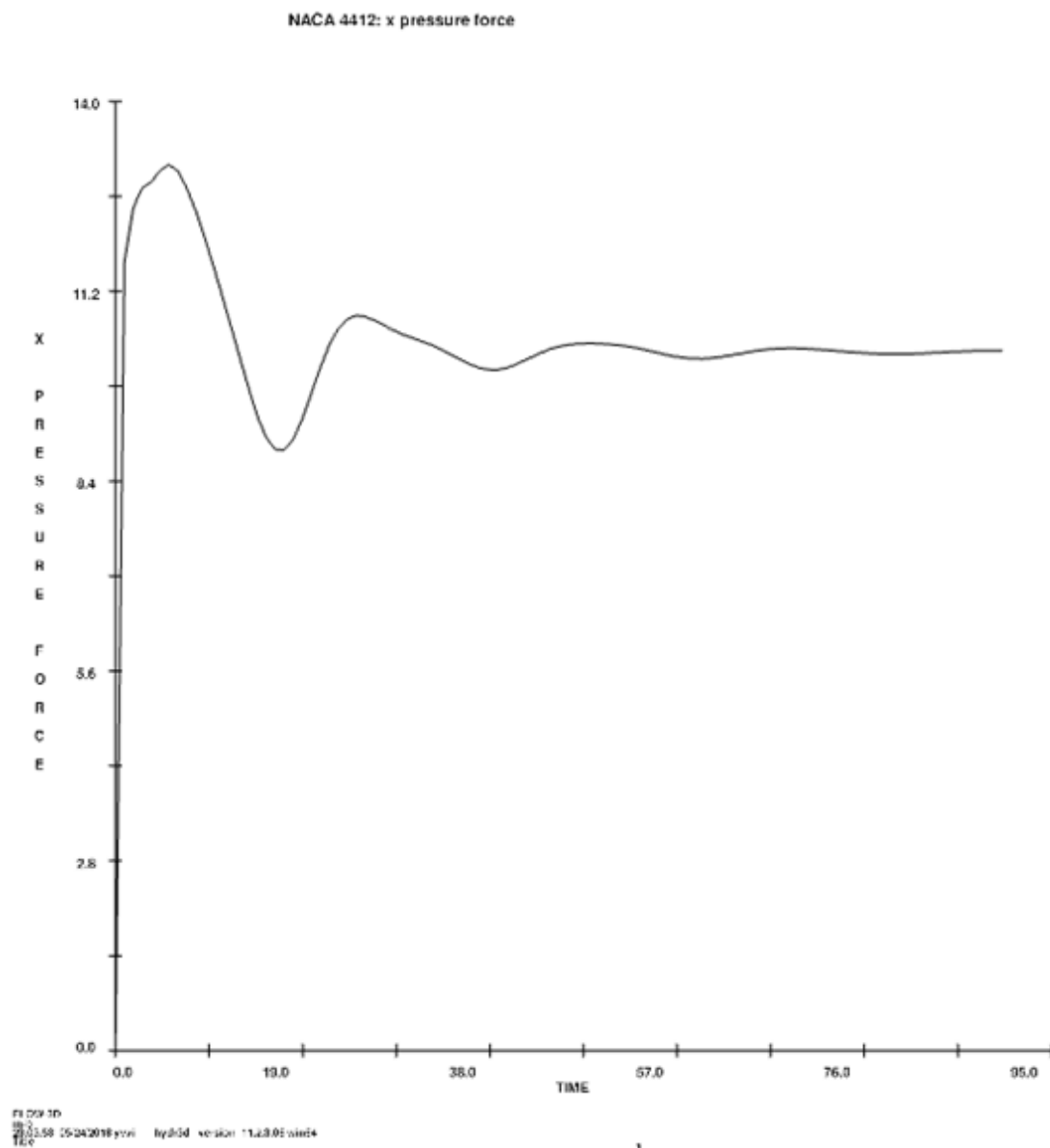


Figura 37. Gràfica de la força de resistència en funció del temps per a un angle d'atac de  $-10^\circ$

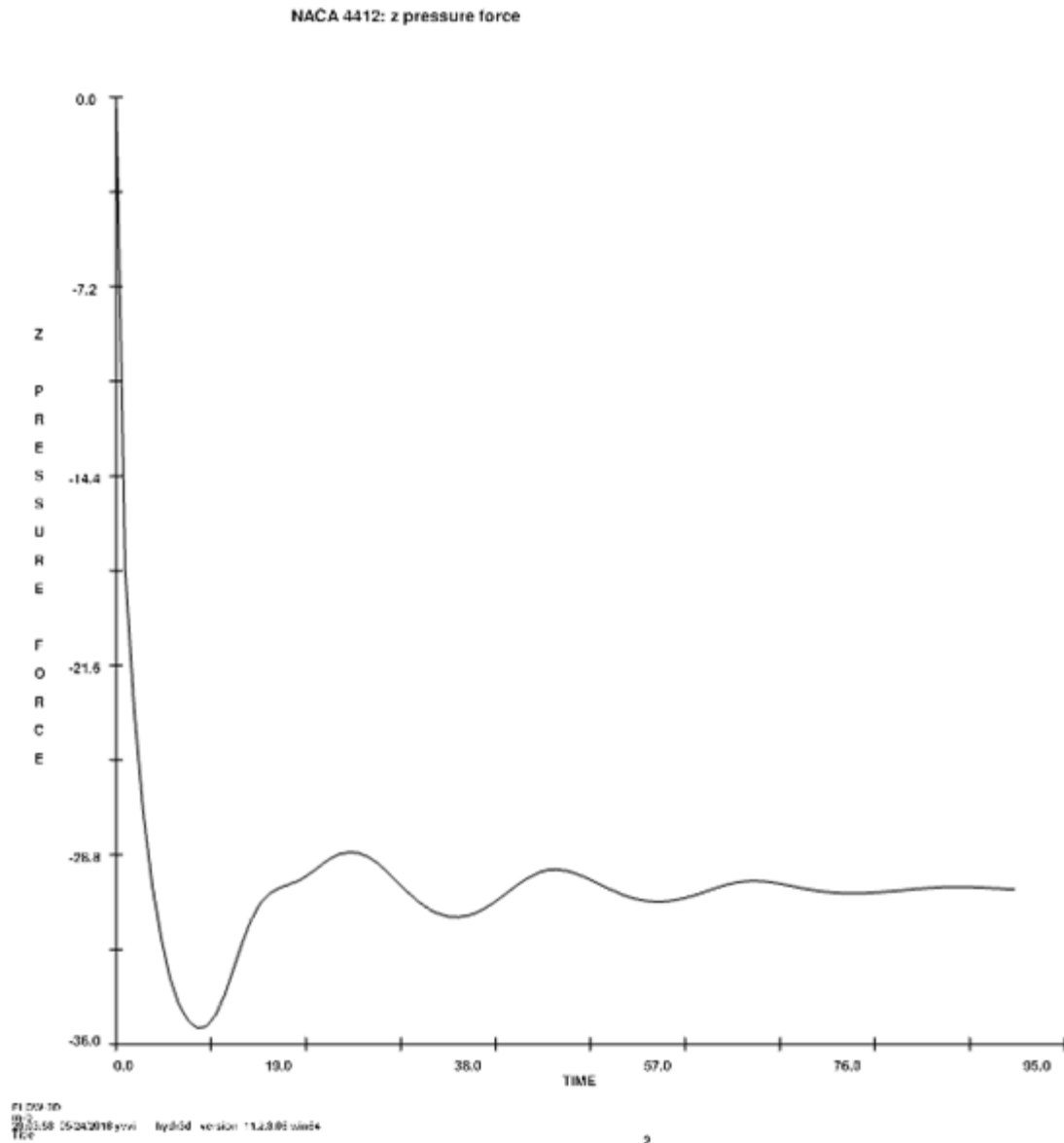


Figura 38. Gràfica de la força de sustentació en funció del temps per a un angle d'atac de  $-10^\circ$

Tal com s'observa en les figures 37 i 38, les gràfiques tenen un cert coeficient d'amortiment i finalment convergeixen a un valor concret, aquest valor al que es tendeix és el que interessa. Així doncs, en la figura 37 es pot apreciar que la força de resistència és d'aproximadament 10 N i, en la figura 38, la de sustentació s'aproxima a -30 N.

Ambdós valors són lògics, ja que la força de resistència té un valor bastant petit tal i com esperaríem d'un perfil alar, i la força de sustentació és negativa ja que tenim un angle d'atac molt negatiu fins a tal punt que l'aire empeny el perfil verticalment i cap avall.

Cal remarcar que s'ha de garantir aquesta convergència de les gràfiques en totes les simulacions de tal manera que es vegi la tendència a un valor final.

### 5.3.2. Angle d'atac de $-5^\circ$

Pel que fa a les forces per a l'angle d'atac de  $-5^\circ$ , la força de sustentació s'espera que sigui "més positiva" comparat amb l'angle anterior, ja que és la tendència habitual a mesura que incrementa l'angle d'atac.

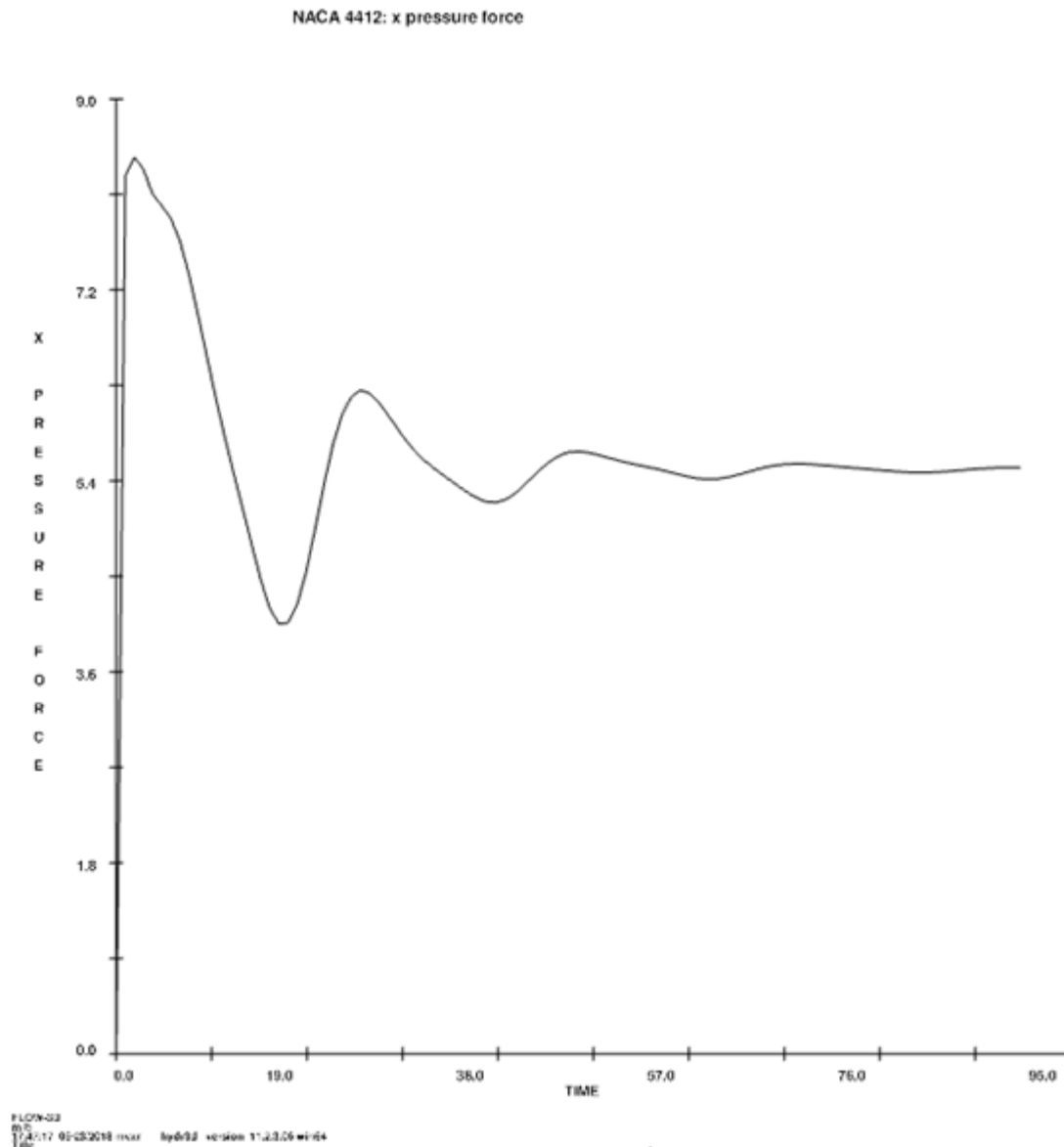


Figura 39. Gràfica de la força de resistència en funció del temps per a un angle d'atac de  $-5^\circ$

Referent a la figura 39, tenim una força de resistència d'aproximadament 5N, valor petit i per tant coherent, tal i com s'esperava.

Aquí ja es comença a apreciar una de les característiques dels perfils alars, que com més angle d'atac tenen (**en valor absolut**), també es genera més força de resistència. De manera que amb un angle de  $-5^\circ$  tenim una resistència menor comparat amb l'angle d'atac de  $-10^\circ$ .

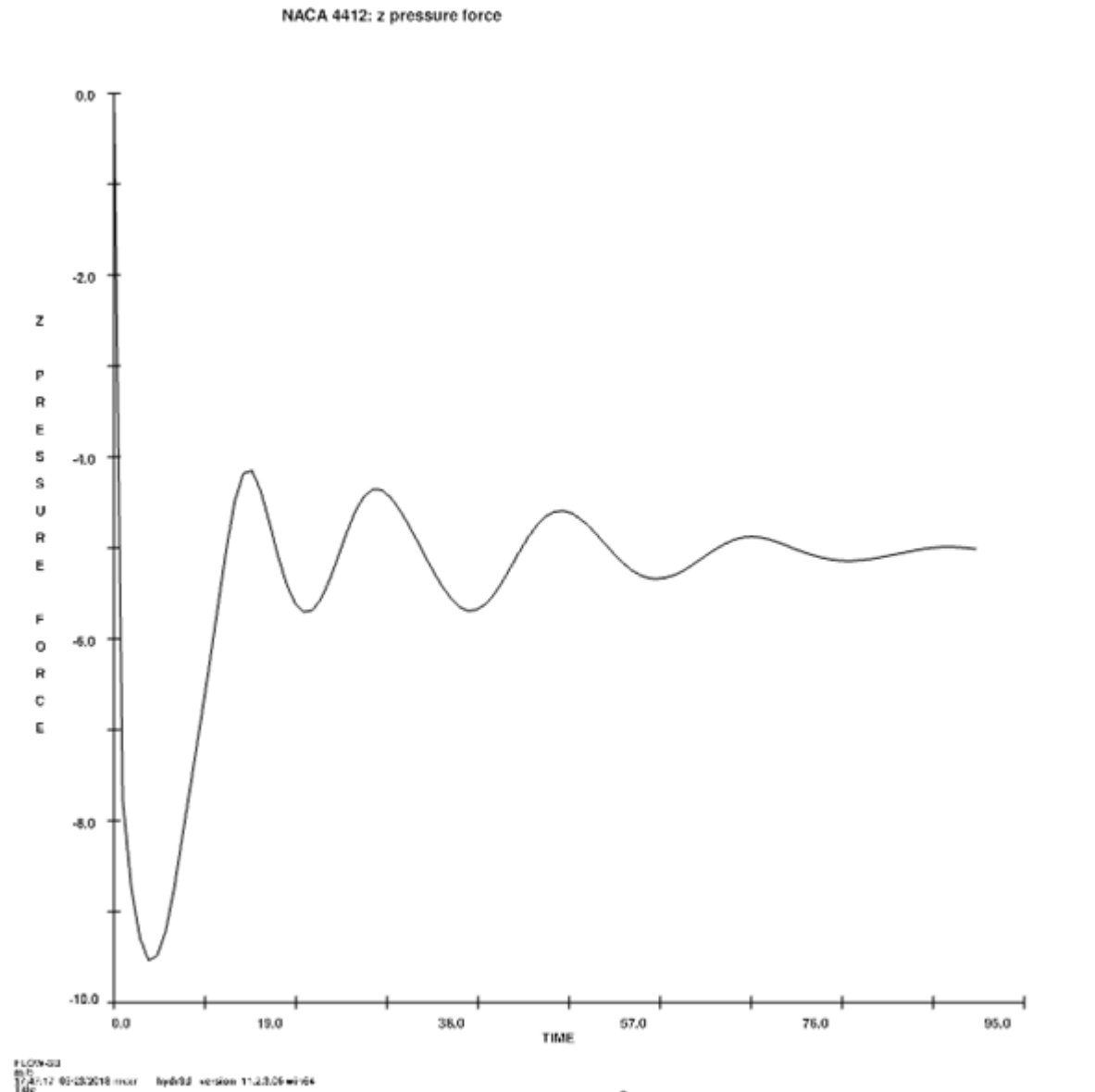


Figura 40. Gràfica de la força de sustentació en funció del temps per a un angle d'atac de  $-5^\circ$

En referència a la figura 40, la força de sustentació s'aproxima a un valor de 5 N, un valor petit, i es pot deduir que l'angle d'atac de  $-5^\circ$  pot ser proper al punt on el perfil NACA 4412 és neutre pel que fa a la força de sustentació, i aquest punt pot ser problemàtic ja que el model no pot ser suficientment precís com per calcular els esforços de sustentació tant petits. De totes maneres això ja es comprovarà en l'apartat <6. Càlcul i anàlisi de resultats>.

### 5.3.3. Angle d'atac de 0°

Per a un angle d'atac de 0°, quan la línia de corda del perfil és perfectament paral·lela a la direcció del vent, tenim les següents gràfiques:

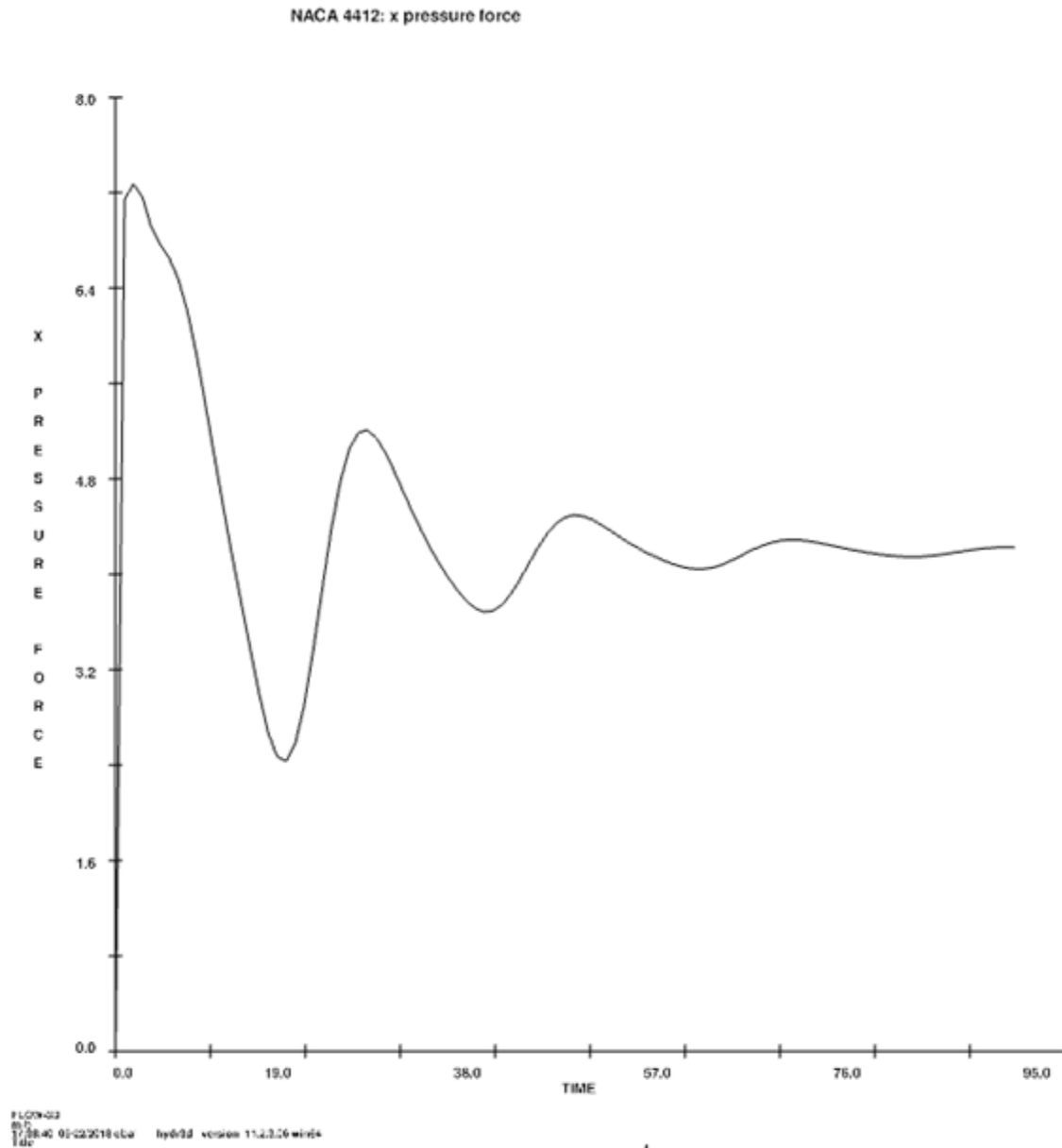


Figura 41. Gràfica de la força de resistència en funció del temps per a un angle d'atac de 0°

En la figura 41 es veu com la força de resistència tendeix a un valor d'aproximadament 4 N, és lògic tenir una resistència més petita a mesura que ens acostem a l'angle d'atac de 0°, ja que la manera que un perfil alar genera menys resistència és precisament per a aquest angle.

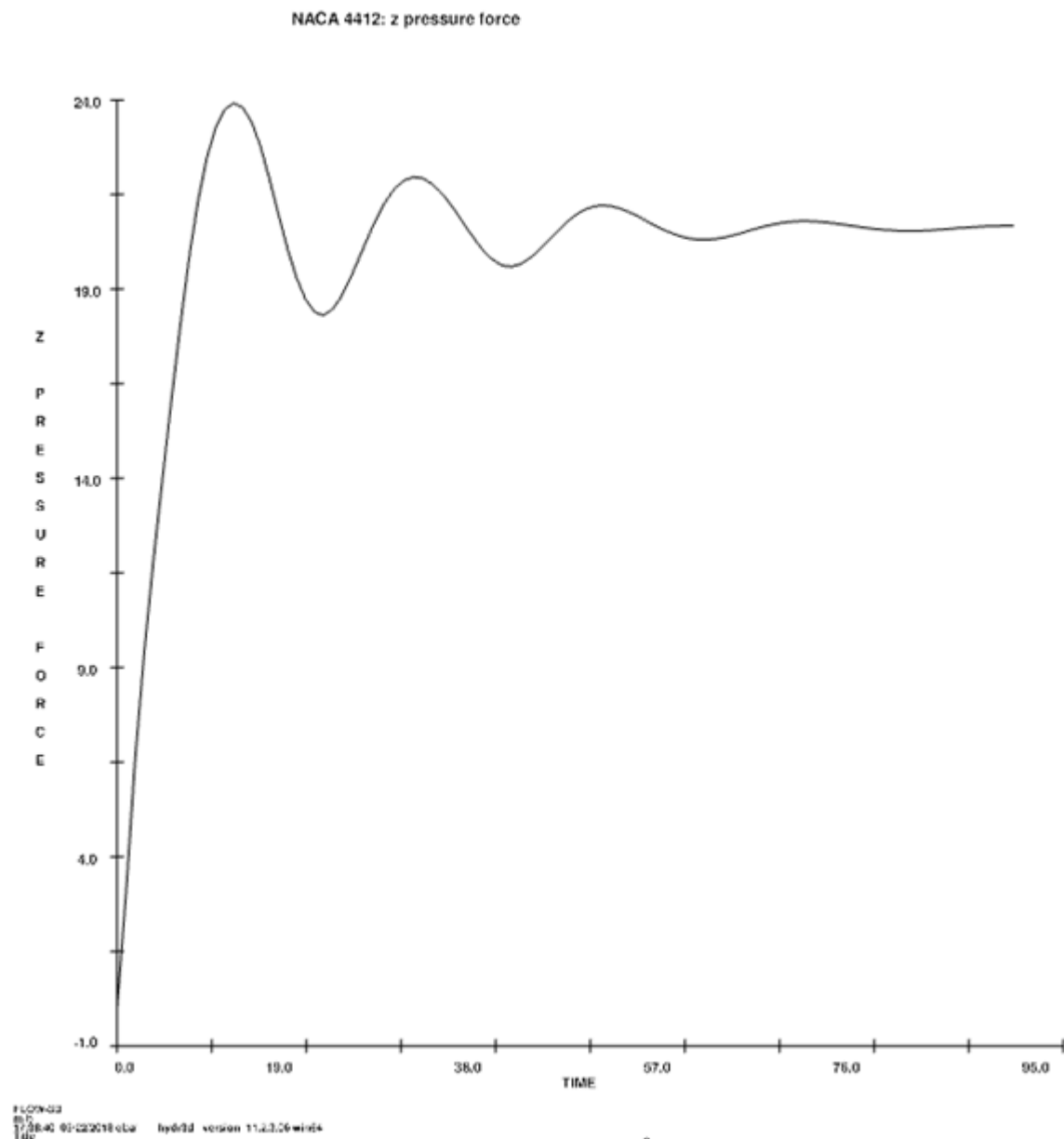


Figura 42. Gràfica de la força de sustentació en funció del temps per a un angle d'atac de  $0^\circ$

Cal destacar que en la figura 42 la força de sustentació és d'aproximadament de 20 N positius. Aquí es pot apreciar com aquest perfil genera força de sustentació positiva quan està paral·lel al flux d'aire, això és degut a la seva lleugera asimetria al llarg de la línia de corda.

### 5.3.4. Angle d'atac de 5°

Pel que fa a l'angle d'atac de 5°, s'obtenen les següents gràfiques:

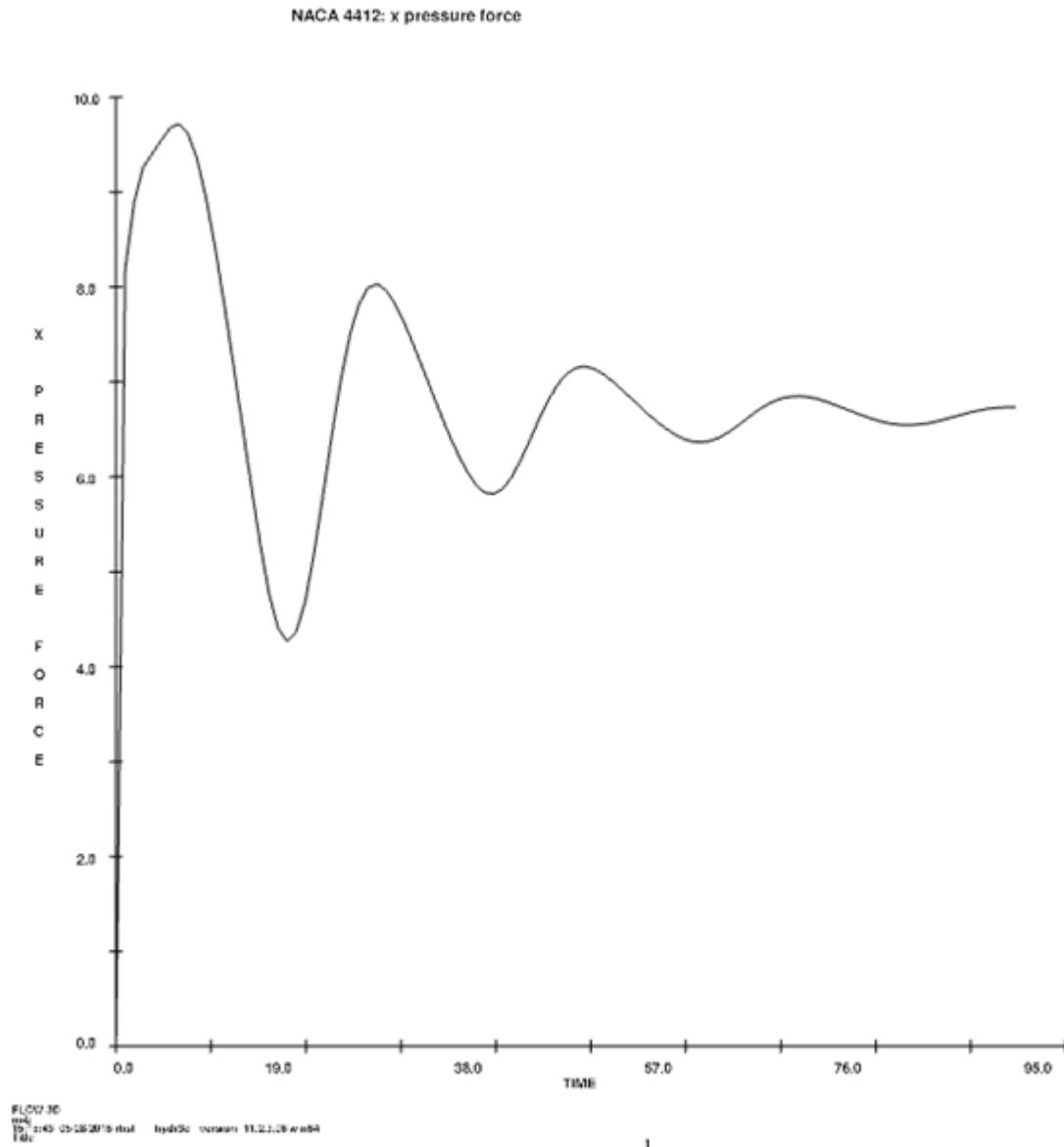


Figura 43. Gràfica de la força de resistència en funció del temps per a un angle d'atac de 5°

En la figura 43 s'hi observa l'aproximació de la força de resistència a un valor de 6.5 N, de manera que tornem a comprovar, aquest cop per angles d'atac positius, que com més angle d'atac es té (en valor absolut) també es genera més força de resistència.



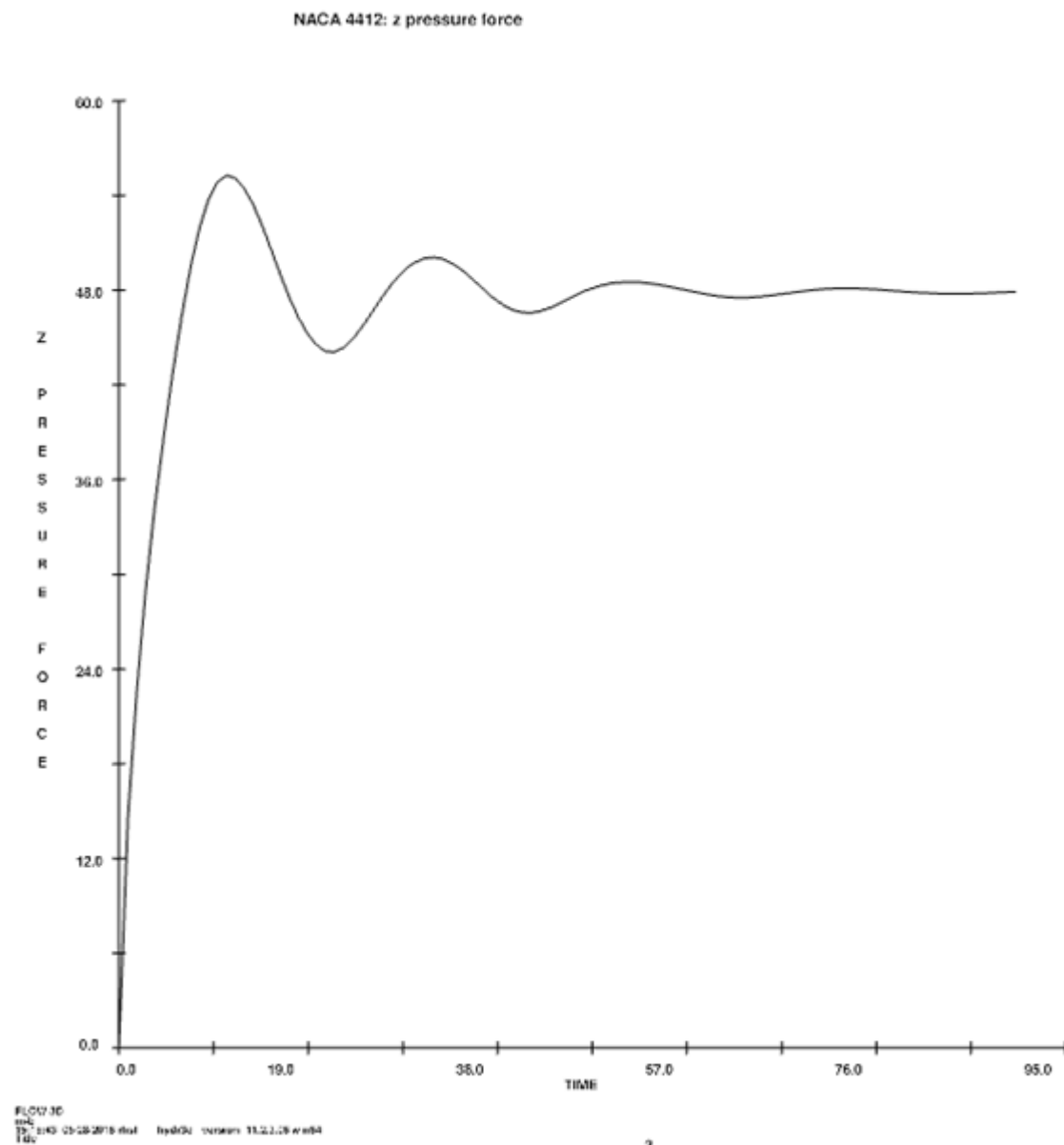


Figura 44. Gràfica de la força de sustentació en funció del temps per a un angle d'atac de  $5^\circ$

Pel que fa a la figura 44, la força de sustentació s'aproxima a 47 N, un valor alt i coherent per l'angle d'atac en qüestió. Com es lògic, a mesura que ens allunyem en el sentit positiu de l'angle d'atac de  $0^\circ$  la força de sustentació creix ràpidament.

### 5.3.5. Angle d'atac de 10°

Com a últim angle d'atac a estudiar, tenim el de 10°, del qual se n'obtenen les següents gràfiques:

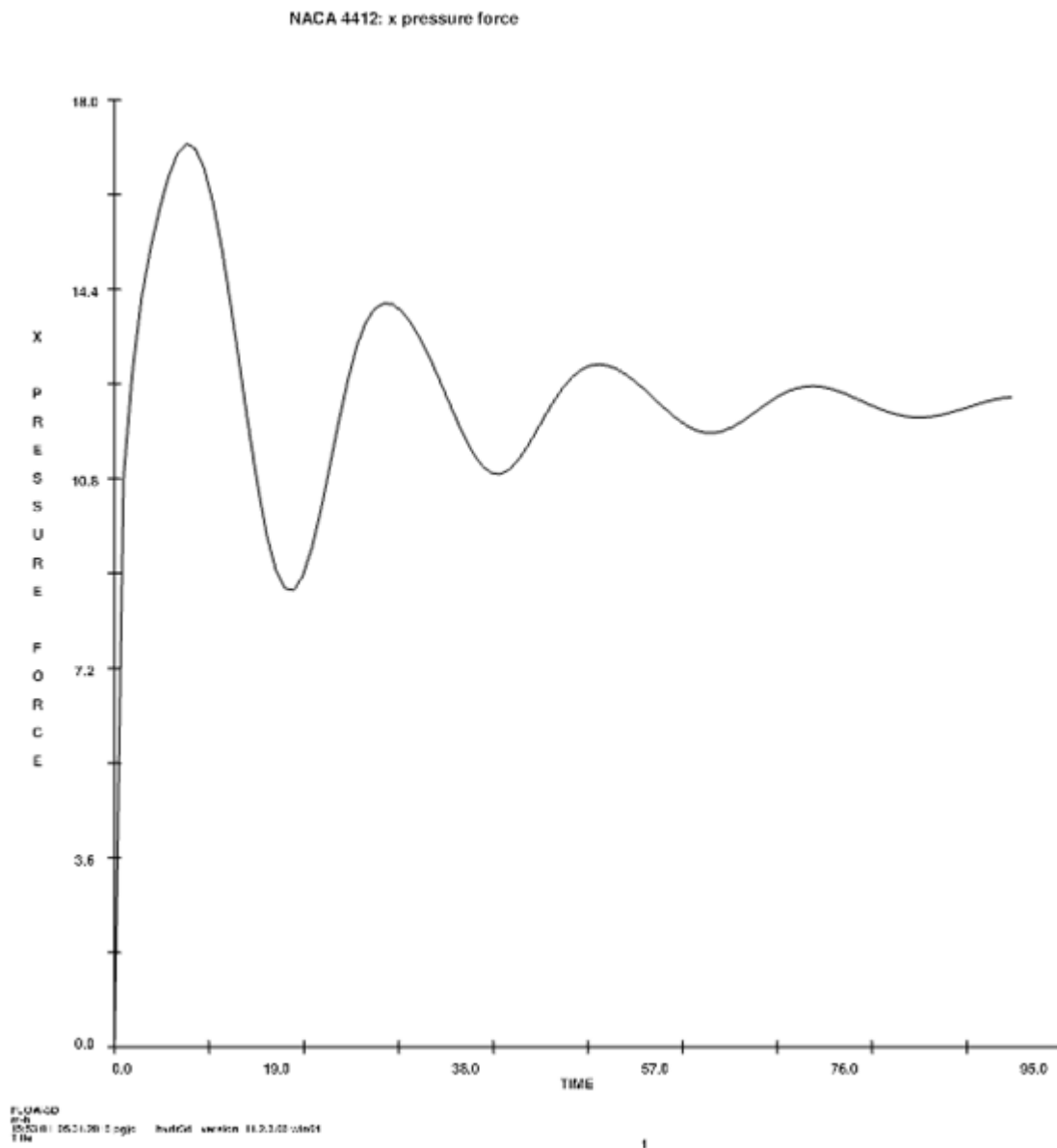


Figura 45. Gràfica de la força de resistència en funció del temps per a un angle d'atac de 10°

En la figura 45 s'hi aprecia la tendència de la força de resistència a un valor d'aproximadament 12 N. Major que per a un angle de 0° i de 5° tal i com hem justificat en les gràfiques anteriors de resistència.

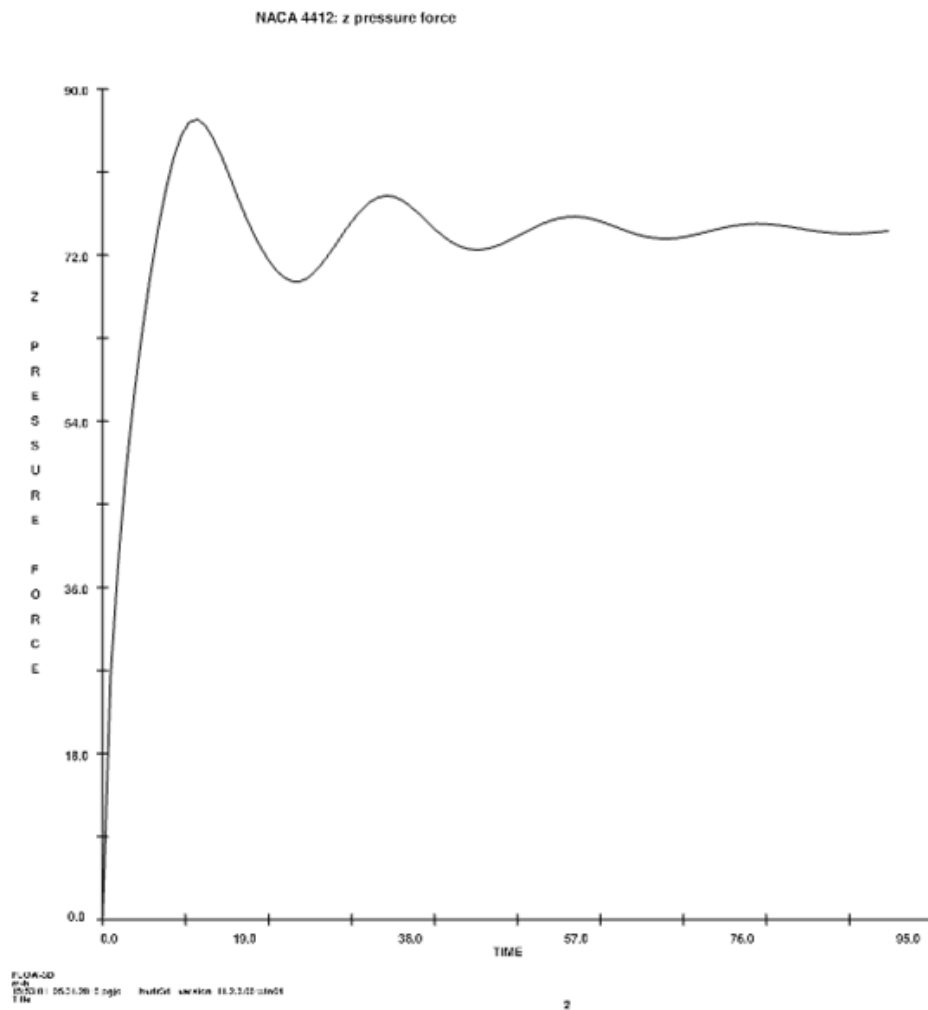


Figura 46. Gràfica de la força de sustentació en funció del temps per a un angle d'atac de  $10^\circ$

Referent a la figura 46, la força de sustentació s'aproxima a un valor de 72 N, el major obtingut fins ara i amb diferència, un valor coherent degut a l'alt angle d'atac que tenim.

Un cop obtingudes les gràfiques per a cada angle i haver verificat la seva convergència a un valor final, podem considerar que les simulacions de 90 segons han estat suficients.

Ara bé, un cop validades les gràfiques, es pot procedir a l'anàlisi d'aquests resultats. Es podria obtenir el valor de cada força aerodinàmica a partir de la seva gràfica, però ja tindríem un error considerable ja que és difícil aproximar-se a la unitat només veient la gràfica. Per tant, el més adequat és fer-ho numèricament segons es descriu a continuació:

Si, en les mateixes condicions esmentades anteriorment respecte la pestanya de “*Probe*” i “*General history*”, es selecciona l’opció de forma d’output de “*Text*” en comptes de “*Graphical*”, es poden obtenir els valors exactes de cada punt de la gràfica en funció del temps.

En l'apartat que ve a continuació es duu a terme el càlcul i anàlisi dels valors obtinguts



## 6. Càlcul i Anàlisi dels Resultats

En aquest apartat es pretén comprovar l'eficàcia del model virtual de túnel de vent. Aquesta comprovació es durà a terme, tal i com s'ha definit en els objectius, comparant i analitzant els valors de les forces aerodinàmiques del perfil NACA 4412 donades pel model virtual respecte els seus valors reals. Ambdós mètodes treballen en el mateix règim pel que fa a Número de Reynolds i N crítica.

Així doncs, a continuació es duu a terme el següent procediment:

- Càlcul dels valors de forces aerodinàmiques segons el model virtual, a partir dels resultats del post-processament.
- Càlcul dels valors de les forces aerodinàmiques reals a partir dels coeficients aerodinàmics que ofereix Airfoil Tools.
- Anàlisi i comparativa dels valors virtuals amb els reals i càlcul de l'error del model virtual.

### 6.1. Valors característics del perfil NACA 4412 segons el model virtual

Un cop obtinguts els valors de les forces aerodinàmiques de cada punt de totes les gràfiques, a continuació es defineixen els càlculs a dur a terme:

Tenint en compte que en totes les gràfiques, en els últims 15 segons de simulació, el valor de força ja és molt aproximat al seu valor final, es farà la mitjana aritmètica de tots els punts d'aquests últims 15 segons per cada gràfica.

Seguidament, en les taules 6 i 7 s'hi duen a terme els càlculs de les forces de resistència i de sustentació per a cada angle d'atac. A més de la mitjana dels valors ( $\bar{F}$ ), també s'hi calcula la seva desviació típica ( $s_{\bar{F}}$ ). Per tal de comparar la precisió dels resultats entre cada angle també es calcula la desviació típica relativa (també coneguda com el coeficient de variació,  $[CV]$ ), aquesta és el quocient de la desviació típica amb la mitjana i es sol expressar com a percentatge tal i com es mostra a continuació:

$$CV (\%) = \frac{s_{\bar{F}}}{\bar{F}} \cdot 100$$

<b>Força de resistència aerodinàmica (N) per a diferents angles d'atac <math>\alpha</math></b>					
<b>Temps (s)</b>	<b><math>\alpha = -10^\circ</math></b>	<b><math>\alpha = -5^\circ</math></b>	<b><math>\alpha = 0^\circ</math></b>	<b><math>\alpha = 5^\circ</math></b>	<b><math>\alpha = 10^\circ</math></b>
75,60	10.293	5.504	4.177	6.611	12.218
76,50	10.285	5.497	4.166	6.583	12.145
77,40	10.279	5.490	4.157	6.561	12.080
78,30	10.275	5.484	4.150	6.548	12.027
79,20	10.274	5.480	4.147	6.544	11.987
80,10	10.275	5.479	4.146	6.548	11.966
81,00	10.279	5.480	4.149	6.560	11.963
81,90	10.284	5.484	4.156	6.578	11.978
82,80	10.291	5.490	4.166	6.602	12.006
83,70	10.298	5.497	4.178	6.628	12.046
84,60	10.305	5.504	4.190	6.655	12.095
85,50	10.311	5.512	4.202	6.680	12.149
86,40	10.316	5.517	4.212	6.701	12.204
87,30	10.320	5.522	4.219	6.718	12.255
88,20	10.322	5.524	4.224	6.728	12.298
89,10	10.322	5.526	4.226	6.733	12.330
90,00	10.321	5.525	4.225	6.733	12.351
<b><math>\overline{F_D}</math> (N)</b>	10.297	5.501	4.182	6.630	12.123
<b><math>S_{\overline{F_D}}</math> (N)</b>	0.019	0.017	0.030	0.072	0.133
<b>CV (%)</b>	0.180	0.315	0.725	1.087	1.093

Taula 6. Forces de resistència en funció del temps i angle d'atac

Força de sustentació (N) per a diferents angles d'atac $\alpha$					
Temps (s)	$\alpha = -10^\circ$	$\alpha = -5^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
75,60	-30.247	-5.139	20.606	48.062	75.368
76,50	-30.225	-5.144	20.579	48.021	75.317
77,40	-30.198	-5.141	20.559	47.975	75.228
78,30	-30.167	-5.133	20.545	47.930	75.109
79,20	-30.135	-5.119	20.539	47.888	74.967
80,10	-30.103	-5.103	20.539	47.850	74.820
81,00	-30.074	-5.084	20.546	47.818	74.681
81,90	-30.051	-5.064	20.559	47.793	74.557
82,80	-30.034	-5.044	20.575	47.778	74.453
83,70	-30.025	-5.026	20.594	47.771	74.373
84,60	-30.023	-5.011	20.614	47.773	74.322
85,50	-30.029	-4.999	20.632	47.783	74.305
86,40	-30.042	-4.992	20.647	47.799	74.322
87,30	-30.060	-4.990	20.659	47.821	74.368
88,20	-30.081	-4.994	20.667	47.847	74.434
89,10	-30.102	-5.002	20.671	47.873	74.514
90,00	-30.123	-5.014	20.671	47.899	74.603
$\overline{F_L} (N)$	-30.101	-5.059	20.600	47.864	74.691
$S_{\overline{F_L}} (N)$	0.072	0.060	0.050	0.089	0.372
$CV$ (%)	0.239	1.191	0.241	0.186	0.498

Taula 7. Forces de sustentació en funció del temps i angle d'atac

Així doncs, tal i com s'ha calculat en la taula 6 i 7, s'han obtingut els valors concrets de les forces aerodinàmiques generades per l'aire sobre el perfil NACA 4412 en el règim descrit. Cal remarcar que aquests valors mitjans obtinguts són perfectament vàlids degut a les baixes desviacions estàndards i als coeficients de variació, els quals són iguals o inferiors a l'1%, per tant es pot afirmar amb tota certesa que es pot confiar en els valors mitjans obtinguts entre  $t = 75s$  i  $t = 90s$ .

En la taula 8 s'hi mostren aquests valors mitjans per a les dues forces aerodinàmiques. De manera que s'han obtingut els resultats del model virtual, els qual es compararan posteriorment amb els valors reals un cop es calculin.

<b><i>Angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i></b>	<b><i><math>F_D</math> (N) Virtual</i></b>	<b><i><math>F_L</math> (N) virtual</i></b>
-10.000	10.297	-30.101
-5.000	5.501	-5.059
0.000	4.182	20.600
5.000	6.630	47.864
10.000	12.123	74.691

Taula 8. Forces aerodinàmiques obtingudes en les simulacions

## 6.2. Valors característics reals del perfil NACA 4412

Partint de les dades que disposem d'Airfoil Tools i, mitjançant els càlculs apropiats, es pot dur a terme el càlcul de les forces de sustentació i resistència aerodinàmica per a cada angle que hem estudiat amb el model virtual. A continuació es realitzen els càlculs corresponents:

- Coeficient de sustentació:

De la fórmula del coeficient de sustentació per a perfils alars, si se n'aïlla la força de sustentació ( $F_L$ ) queda tal i com es veu a continuació:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot u^2 \cdot l_c} \rightarrow F_L = \frac{C_L \cdot \rho \cdot u^2 \cdot l_c}{2}$$

On:

$C_L$ , el coeficient de sustentació, depèn de l'angle d'atac.

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$



$$u = 14.37 \frac{m}{s}$$

$$l_c = 1.016 \text{ m}$$

Per tant, si substituïm els valors anterior a l'equació, ens queda la següent equació simplificada:

$$F_L = \frac{C_L \cdot 1.225 \cdot 14.37^2 \cdot 1.016}{2} \rightarrow F_L = 128.503 \cdot C_L$$

Un cop simplificada l'equació, farem el mateix per al coeficient de resistència:

- Coeficient de resistència:

El coeficient de resistència es defineix amb una equació molt similar a la del coeficient de sustentació, de fet hi apareixen les mateixes variables. De manera que ens queda l'equació següent.

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot u^2 \cdot l_c} \rightarrow F_D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot u^2 \cdot l_c}{2} = \frac{C_D \cdot 1.225 \cdot 14.37^2 \cdot 1.016}{2} \rightarrow F_L = 128.503 \cdot C_D$$

De manera que ja tenim la relació entre els coeficients i les forces. Així doncs, per obtenir els valors de  $C_D$ ,  $C_L$  per a cada angle d'atac, es fa des de la base de dades d'Airfoil Tools i, pels angles que hem simulat nosaltres i amb el règim de treball descrit, tenen els valors de la taula 9:

<b>Angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</b>	<b><math>C_D</math></b>	<b><math>C_L</math></b>
-10.000	0.01529	-0.6172
-5.000	0.00845	0.0718
0.000	0.00678	0.4833
5.000	0.00797	1.0254
10.000	0.01746	1.4317

Taula 9. Coeficients aerodinàmics reals del perfil alar NACA 4412

Un cop obtingudes es dades anteriors es procedeix a calcular els valors esperats de la força de sustentació  $F_L$  i la força d'arrosegament  $F_D$  per a cada angle d'atac, utilitzant les equacions anteriors podem obtenir les dades que es mostren en la taula 10:

<b><i>Angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i></b>	<b><i><math>F_D</math> (N) Real</i></b>	<b><i><math>F_L</math> (N) Real</i></b>
-10.000	1.968	-79.422
-5.000	1.087	9.239
0.000	0.872	62.192
5.000	1.026	131.950
10.000	2.247	184.234

Taula 10. Forces aerodinàmiques reals del perfil alar NACA 4412

Els valors de taula 10 són les forces reals que genera el perfil alar NACA 4412 en els angles d'atac estudiats. Per tant, a continuació es fa la comparativa de resultats amb els valors obtinguts en les simulacions del Flow3d.

### 6.3. Anàlisi i comparativa dels resultats

Com que ja s'han obtinguts els resultats de les forces aerodinàmiques tant realment com virtualment, a continuació s'analitzen numèricament i es comparen:

<b><i>Angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i></b>	<b><i><math>F_D</math> (N) Real</i></b>	<b><i><math>F_D</math> (N) Virtual</i></b>	<b><i><math>F_L</math> (N) Real</i></b>	<b><i><math>F_L</math> (N) Virtual</i></b>
-10.000	1.968	10.297	-79.422	-30.101
-5.000	1.087	5.501	9.239	-5.590
0.000	0.872	4.182	62.192	20.600
5.000	1.026	6.630	131.950	47.864
10.000	2.247	12.123	184.234	74.691

Taula 11. Forces aerodinàmiques reals i virtuals del perfil alar NACA 4412

En la taula 11 hi ha els resultats de les forces aerodinàmiques reals i virtuals, es pot apreciar que els resultats no són semblants, la força de resistència real és molt més petita que la virtual, i, pel que fa a la força de sustentació, just el contrari, la real és més gran que la virtual.

Ara bé, abans de treure conclusions precipitades, cal notar la seva proporcionalitat entre elles, i s'hi pot veure certa correlació, de manera que en la taula 12 s'hi calculen els quocients de les forces virtuals amb les reals, els qual anomenarem  $K_D$  i  $K_L$ , per les forces de resistència i de sustentació respectivament:

<i>angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i>	$K_D = \frac{F_D (N) \text{ Virtual}}{F_D (N) \text{ Real}}$	$K_L = \frac{F_L (N) \text{ virtual}}{F_L (N) \text{ real}}$
-10.000	5.233	0.379
-5.000	5.059	-0.605
0.000	4.793	0.331
5.000	6.465	0.363
10.000	5.396	0.405
$\bar{K}$	5.389	0.370
$S_{\bar{K}}$	0.641	0.031
$CV$ (%)	11.899	8.398

Taula 12. Quocient de les forces aerodinàmiques reals i virtuals del perfil alar NACA 4412

En la taula 12 també s'hi ha calculat la mitjana d'aquests quocients, així com la seva desviació estàndard i coeficient de variació.

En aquest anàlisi estadístic no s'hi ha tingut en compte el valor senyalat en groc en la taula 12, ja que es diferencia clarament dels altres i es tracta de la força de sustentació per a un angle d'atac de  $-5^\circ$ . Ja que, com es pot observar en taula 11, per a un angle d'atac de  $-5^\circ$  tenim un força de sustentació real molt petita (propera a zero) i la precisió que tenim en la simulació no es suficient per determinar forces de sustentació petites, i dona errors fins a tal punt de donar certa sustentació contrària al valor real, com és aquest cas.

Tal com es pot apreciar en la taula 12, es comprova la correlació entre les forces reals i virtuals (descartant el valor de la força de sustentació per a un angle d'atac de  $-5^\circ$ , tal i com s'ha justificat prèviament), de manera que:

- Per les forces de resistència, les reals són aproximadament 5.3 vegades més petites que les virtuals

- Per les forces de sustentació, les reals són aproximadament  $(1 / 0.37 = 2.702)$  2.702 vegades més grans que les virtuals.

Aquests quocients, al aproximar-se tant entre ells, es poden considerar constants, ja que tenen un coeficient de variació del 10% aproximadament.

La causa d'aquestes constants pot venir donada pel pas que s'ha fet de passar els coeficients reals a forces reals, ja que hi ha varies maneres de calcular-se i, en aquest cas, s'ha optat per la forma exclusiva de perfils alars.

S'han comprovat i descartat altres tipus d'equacions que tenien en compte l'àrea projectada de l'eix X i Z, així com només tenir en compte l'àrea projectada en l'eix X en forces de resistència i sustentació. Altres possibilitats involucren que els coeficients de Airfoil Tools es calculin numèricament mitjançant equacions que descriuen la geometria del perfil. Aquestes equacions només serveixen per obtenir els coeficients a partir de la geometria, no serveixen per transformar els coeficients a forces.

També s'ha comprovat que les forces donades pel Flow3d, al denominar-se "*Pressure force*" no tinguessin en compte algun tipus d'àrea tant del perfil com a tal o pel que fa a les mides del model, i cap d'aquestes possibilitats ha resultat satisfactòria ja que no tenen res a veure amb les constants  $K_D$  i  $K_L$ .

Havent descartat les possibilitats de solucionar o trobar l'origen d'aquestes constants amb les maneres que es tenen a l'abast, s'opta per considerar que els valors donats per les simulacions són correctes i que l'origen d'aquestes constants es troba en la conversió de coeficients aerodinàmics a forces aerodinàmiques. Per tant, s'estableixen com a constants a tenir en compte en el cas de calcular les forces aerodinàmiques d'un perfil alar. De manera que:

$$K_D = 5.389 \quad , \quad K_L = 0.370$$

Per tal de fer l'anàlisi dels resultats de manera adequada, les constants  $K_D$  i  $K_L$  s'operen tal i com es mostra a continuació:

$$K \approx \frac{F_{Virtual}}{F_{Real}} \rightarrow F_{Real} \approx \frac{F_{Virtual}}{K}$$

Per tant, dividirem les forces virtuals per la seva K corresponent i a partir d'aquí compararem aquests valors amb el valor real, tal i com es mostra en la taula 13:

<i>Angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i>	<i><math>F_D</math> (N) Real</i>	<i><math>\frac{F_D (N) Virtual}{K_D}</math></i>	<i><math>F_L</math> (N) real</i>	<i><math>\frac{F_L (N) Virtual}{K_L}</math></i>
-10.000	1.968	1.911	-79.422	-81.443
-5.000	1.087	1.021	9.239	-15.125
0.000	0.872	0.776	62.192	55.736
5.000	1.026	1.230	131.950	129.503
10.000	2.247	2.249	184.234	202.088

Taula 13. Comparativa de les forces aerodinàmiques virtuals i reals del perfil alar NACA 4412

En la taula 13 sí que es poden comparar clarament els resultats i veure que en alguns casos s'aproximen molt, i en d'altres són propers i acceptables. Òbviament el resultat de la força de sustentació per a un angle d'atac de  $-5^\circ$  segueix estant descartat.

Partint de taula 13, ara sí que té sentit calcular l'error que tenen els resultats obtinguts segons el Flow3d respecte els valors reals de Airfoil Tools. En aquest cas caldrà parlar d'error relatiu, en percentatge, per tal d'analitzar i comparar els errors entre les dues forces.

L'error relatiu pot tenir valors positius o negatius, depenent si és per excés (negatiu) o per defecte (positiu), i no té unitats, per tant s'expressarà en percentatge per treballar amb valors de més comoditat. L'error relatiu es calcula segons la següent equació (en aquesta hi apareix la lletra F ja que l'apliquem a forces):

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{F - F_i}{F} \cdot 100$$

On  $F$  és la força real, ja que es el valor que hauria de donar, i  $F_i$  és la força virtual,

En la taula 14 hi ha els errors relatius de les forces virtuals que s'han obtingut, sempre respecte la seva força real corresponent.

<i>angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i>	$\epsilon_{rD}(\%)$	$\epsilon_{rL}(\%)$
-10.000	2.89	-2.54
-5.000	6.13	263.70
0.000	11.06	10.38
5.000	-19.95	1.85
10.000	-0.12	-9.69

Taula 14. Error relatiu de les forces aerodinàmiques virtuals respecte les reals

En la taula 14 hi ha errors relatius positius i negatius. Per exemple, en la simulació de l'angle d'atac de 10° els resultats han sigut clarament superiors als reals, d'aquí els valors negatius d'error relatiu.

Cal destacar l'error de quasi el -20% de la força de resistència per a l'angle d'atac de 5°. Tot i així, tots els altres errors estan aproximadament entre el -10% i el +10%. Per tant podem considerar els resultats satisfactoris al tractar-se de la primera versió del model virtual.

Per acabar de fer una valoració final i obtenir les conclusions definitives passarem aquests errors relatius al seu valor absolut (passant els negatius a positius) de manera que se'n pugui fer una mitjana aritmètica (excloent l'únic resultat defectuós) i obtenir l'error relatiu mitjà de cada força aerodinàmica. En la taula 15 s'hi mostren els resultats esmentats:

<i>angle d'atac: <math>\alpha</math> (°)</i>	$ \epsilon_{rD}  (\%)$	$ \epsilon_{rL}  (\%)$
-10.000	2.89	2.54
-5.000	6.13	263.70
0.000	11.06	10.38
5.000	19.95	1.85
10.000	0.12	9.69
$\overline{ \epsilon_r } (\%)$	8.03	6.12

Taula 15. Error relatiu mitjà de les forces aerodinàmiques virtuals respecte les reals

De manera que:

- La força de resistència aerodinàmica obtinguda en el model virtual presenta un error relatiu (en valor absolut) d'un 8.03% de mitjana.
- La força de sustentació obtinguda en el model virtual presenta un error relatiu (en valor absolut) d'un 6.12% de mitjana.

Per acabar de concloure l'anàlisi dels resultats, es fa la mitjana dels dos resultats prèviament mencionats per tal d'obtenir l'error relatiu del model.

$$\overline{|\varepsilon_{r \text{ model virtual}}|} = \frac{\overline{|\varepsilon_{rD}|} + \overline{|\varepsilon_{rL}|}}{2} = \frac{8.03 + 6.12}{2} = 7.08 \%$$

**Per tant, el model virtual creat en aquest projecte en el programari Flow3d presenta un error relatiu (en valor absolut) d'un 7.08 % de mitjana pel que fa a calcular forces aerodinàmiques, utilitzant el mètode de les constants  $K_D$  i  $K_L$**





## 7. ASPECTES A MILLORAR

Un cop calculat l'error que presenta aquest model, cal fer una valoració de quins paràmetres cal millorar i com s'ha de fer. A continuació es llisten les millores a tenir en compte pel model creat en aquest projecte:

Primer de tot, caldria reduir més el mallat, tant en el general com l'específic proper al perfil. Uns valors d'aresta de cèl·lula de 0.02 i 0.01 metres per cada mallat respectivament suposarien una millora considerable en la precisió dels resultats. Però també suposarien un temps major de realització de la simulació pel servidor, i en alguns casos és difícil si el servidor també el fan servir més persones. De manera que aquests valors són ideals i s'haurien de fer servir si fos possible per les circumstàncies del servidor. Per a aquest projecte s'han utilitzat els valors de 0.03 i 0.015 metres per tenir una primera aproximació a veure l'efectivitat del model, i, un cop comprovada, s'esmenten aquestes millores descrites.

En segon lloc, augmentar el temps de simulació de 90 segons a 120 o 140 segons, per tal de tenir encara més convergència en els valors finals. Tant aquesta millora com l'anterior també suposarien un increment molt considerable en la mida dels arxius de la simulació els quals possiblement serien superiors a 10 GB.

En tercer lloc, dur a terme més simulacions especialment per a angles d'atac que tinguin forces de sustentació properes a zero, per tal d'obtenir resultats més fiables i evitar errors de la magnitud de la força de sustentació de l'angle d'atac de  $-5^\circ$ . Per exemple, seria idoni fer simulacions amb les millores esmentades anteriorment per a angles d'atac de  $-7^\circ$ , repetir la simulació per a  $-5^\circ$ , i també per a  $-3^\circ$ , totes òbviament del perfil NACA 4412 amb el règim descrit en aquest treball, de manera que es veuria fins on arriba aquesta falta de precisió quan hi ha forces de sustentació petites.

En quart i últim lloc, caldria esbrinar, si fos possible, l'origen de les constants utilitzades en aquest treball per tal de comparar adequadament els resultats. Ja que han sigut el problema principal de l'anàlisi de resultats que no s'ha pogut solucionar i, conseqüentment s'ha hagut de descriure tal mètode per seguir endavant.

I fins aquí les possibles millores del model després d'haver realitzat la primera aproximació a crear un model virtual de túnel de vent, del qual cal remarcar la precisió obtinguda en els resultats tot i tenir les circumstàncies esmentades. Ja que s'ha demostrat el bon comportament del flux d'aire i la forta correlació entre els valors virtuals obtinguts i els valors reals.



## 8. ESTUDI TEMPORAL I IMPLICACIONS AMBIENTALS

Pel que fa a l'anàlisi temporal del projecte, aquest és oportú per tal de detallar cada activitat duta a terme des de l'assignació del projecte fins a completar-lo. També s'hi especifiquen les hores dedicades a cada tasca per tal de tenir-ne una visió global tal i com s'observa en la taula 16:

Descripció	Temps de dedicació (h)	Percentatge de dedicació (%)
Informació i documentació prèvia	15	3.4
Aprenentatge Flow3d	60	13.7
Càlculs de la fase inicial	15	3.4
Model 3D SolidWorks	12	2.7
Pre-processament Flow3d	130	29.7
Post-processament Flow3d	90	20.6
Càlculs de la fase final	40	9.2
Redacció de la memòria	75	17.2
<b>Total</b>	<b>437</b>	

Taula 16. Dedicació temporal en les tasques del projecte

De manera que la dedicació total per a la realització del projecte ha estat de 437 hores. A més, tal i com es pot observar en la taula 16, el pre-processament i el post-processament utilitzant el Flow3d suposen més del 50% del projecte, i també cal destacar les hores dedicades a aprendre a utilitzar el programari.

Com que les simulacions es feien des d'un servidor, cal esmentar el total d'hores de simulació que s'hi ha fet al llarg del projecte és d'aproximadament 360 hores.

En referència a les implicacions ambientals del projecte, cal considerar que, al ser totalment virtual i a l'haver-se realitzat completament des d'un ordinador, els impactes ambientals es podrien considerar nuls. Ara bé, al tractar-se d'un model virtual, implica cert consum

elèctric, el qual suposa certes emissions de  $CO_2$ . Aquestes emissions es calculen a continuació a la taula 17:

<b>Font de consum</b>	<b><i>Temps (h)</i></b>	<b><i>kW</i></b>	<b><i>kg CO<sub>2</sub>/kWh</i></b>	<b><i>kg CO<sub>2</sub></i></b>
Ordinador portàtil	437	0.120	0.392	20.556
Servidor de simulació	360	0.224	0.392	31.611
			<b>Total</b>	52.167

Taula 17. Emissions de  $CO_2$  en la realització del projecte

Per tant, la realització del projecte considerant les hores dedicades a ell i les hores de simulació en el servidor, suposen unes emissions de 52.167 kg de  $CO_2$ .

Després d'haver calculat les emissions de  $CO_2$ , és necessari destacar que fer servir programari de CFD permet una simulació efectiva de la realitat i suposen l'estalvi d'hores d'experimentació pràctica dutes a terme en els equips reals. Per exemple, en un túnel de vent real, les hores i costos de disseny, muntatge i calibratge serien molt superiors comparats als de la simulació virtual.

Cal remarcar que, per aquest projecte, un estudi econòmic no és d'especial interès degut que no s'ha treballat amb pressupostos i, per exemple, el cost de les llicències dels softwares utilitzats no són remarcables ja que només s'han utilitzat durant 4 mesos i les hores dedicades no són significatives respecte les 4800 hores que solen tenir de vida útil anual, a part que algunes llicències són de versió per a estudiants. A més, les hores de dedicació d'estudiant tampoc suposen cap cost i, per no haver de suposar casos professionals hipotètics, es descarta qualsevol estudi econòmic degut a les circumstàncies del projecte.

## 9. CONCLUSIONS

Dur a terme aquest projecte ha aportat una gran quantitat de coneixements pel que fa a l'aerodinàmica, la seva aproximació en els softwares de CFD i també els procediments utilitzats tant en el pre-processament com el post-processament. El gran potencial del programari Flow3d i el seu gran rang d'aplicacions ha requerit un nombre considerable d'hores tant per aprendre a utilitzar-lo com per dur a terme tota la definició del model.

Els resultats de les simulacions han aportat una visió detallada de com es comporta el flux d'aire al voltant de cossos com són els perfils alars, amb els diferents nivells de pressió que provoquen les forces de sustentació, així com la desviació de les línies de flux al voltant del perfil d'estudi.

A més, el càlcul necessari per definir el model i l'anàlisi estadístic realitzat han sigut aspectes molt valorables a nivell d'estudiant i de ben segur que seran útils a nivell professional en un futur proper. De manera menys profunda també s'ha adquirit cert coneixement sobre els mètodes de discretització més comuns, com per exemple el mètode de volums finits i arribar a comprendre superficialment les equacions de continuïtat i conservació que s'hi tenen en compte.

Pel que fa l'assoliment dels objectius, es pot afirmar amb tota seguretat que s'ha dissenyat un túnel virtual de vent de manera satisfactòria. I, encara més important, s'ha pogut comprovar la seva efectivitat a l'hora de representar la realitat de manera adequada amb un error bastant menor al 10% pel que fa al càlcul de forces aerodinàmiques, tal i com s'ha conclòs en l'apartat <6.3. Anàlisi i comparativa de resultats>.

També s'ha definit el model tenint en compte cada punt de les especificacions de l'apartat <1.1. Objectius i finalitat del projecte> i també els abasts i limitacions esmentats a l'apartat <1.2. Abasts i limitacions del projecte>, de manera que el model virtual es perfectament escalable a mides coherents i s'hi pot estudiar qualsevol cos mentre se'n tingui el seu arxiu en format .STL. A més, el model és modificable pel que fa a formes de les parets, la velocitat de treball, propietats del flux d'aire, etc. I, per últim, el model permet l'observació dels moviments del flux d'aire al voltant de cossos i estructures simples, sempre que es defineixi adequadament les característiques de la simulació per a cada cas.

És important posar èmfasi en l'aplicació i continuïtat del projecte, ja que aquest model virtual és perfectament aplicable en àmbits acadèmics i d'investigació. Es dona plena llibertat per recrear i continuar el model descrit i es remarca la importància d'implementar les millores descrites en l'apartat <6.4. Aspectes a millorar> per tal d'obtenir més precisió en els resultats i simular la realitat de manera encara millor.



## 10. BIBLIOGRAFIA

Airfoil Tools. Corbes característiques del perfil alar NACA 4412. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il#polars>

Airfoil Tools. Corbes característiques del perfil alar NACA 4412 per  $Re = 10^6$ . [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-1000000>

Airfoil Tools. Calculadora del número de Reynolds. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber?MReNumForm%5Bvel%5D=14.373&MReNumForm%5Bchord%5D=1.0162&MReNumForm%5Bkvisc%5D=1.4604E-5&yt0=Calculate>

Engineering Toolbox. Calculadora de les viscositats cinemàtica i dinàmica de l'aire atmosfèric. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d\\_601.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html)

Wikipedia. Dinàmica de Fluids Computacional [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)

Wikipedia. Equacions de Navier-Stokes. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations)

Wikipedia. Equacions d'Euler (dinàmica de fluids). [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_equations\\_\(fluid\\_dynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_equations_(fluid_dynamics))

Wikipedia. Vorticitat. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/Vorticidad>

Què és l'aerodinàmica? [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/7230/que-es-la-aerodinamica>

Wikipedia. Animació de fluids. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid\\_animation](https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_animation)

Wikipedia. Model de turbulència k-èpsilon. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon\\_turbulence\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model)

Wikipedia. Número de Mach. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_Mach](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_Mach)

Wikipedia. Línia de corda (aeronàutica). [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chord\\_\(aeronautics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Chord_(aeronautics))

Wikipedia. Flux conservatiu. [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Potential\\_flow#Steady\\_flow](https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_flow#Steady_flow)

Consum d'un ordinador portàtil [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://www.endesaclientes.com/electromito/consumo-ordenador-portatil-sobremesa>

Quant costa l'electricitat que consumeix un ordinador [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://hardzone.es/2015/03/31/cuanto-cuesta-la-electricidad-que-consume-tu-pc/>

Els ordinador també emeten CO<sub>2</sub> [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://www.ecoembes.com/es/planeta-recicla/blog/los-ordenadores-tambien-emiten-co2>

Com calcular emissions de CO<sub>2</sub> associats a l'energia [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduex\\_emissions/com-calculer-emissions-de-geh/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduex_emissions/com-calculer-emissions-de-geh/factors_demissio_associats_a_lenergia/)

## Enllaços de figures

Les figures que no apareixen en aquest llista han sigut creades per l'autor del treball.

Figura 1. Forces aerodinàmiques [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Aeroforzas.svg>

Figura 2. Característiques dels perfils alars [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil#/media/File:Wing\\_profile\\_nomenclature.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil#/media/File:Wing_profile_nomenclature.svg)

Figura 3. Forma del perfil alar NACA 0015 [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/NACA0015\\_a.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/NACA0015_a.png)

Figura 4. Esquema de l'angle d'atac [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Angle\\_of\\_attack.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Angle_of_attack.png)

Figura 5. Classificació del valor de N crítica [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/polar/index>

Figura 6. Exemple de coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>

Figura 8. Forma del perfil NACA 4412[en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://newhive.com/braxton/naca-4412>

Figura 10. Llista de dades que ofereix Airfoil Tools del perfil alar NACA 4412 [en línia]. [Consulta: 4 de juny de 2018]. Disponible a: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>